

# Transmutation von radioaktivem Abfall

Reaktor- und Beschleuniger-Technologie gehen gemeinsam das Hauptproblem der Kernenergie an.

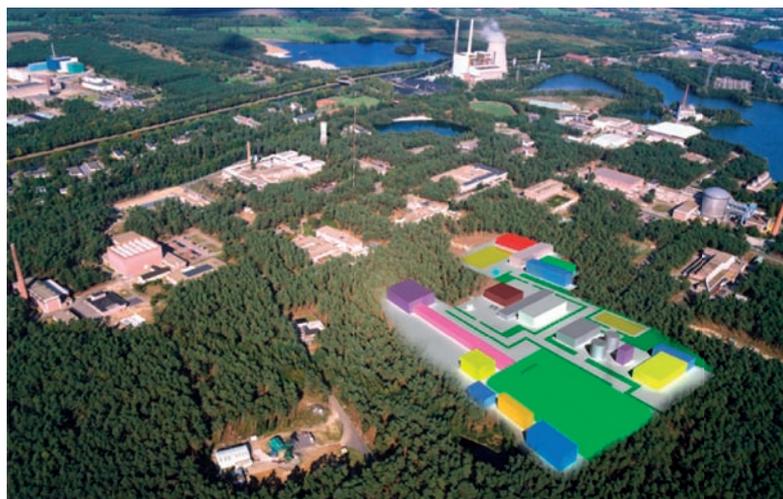
Alex C. Mueller und Hamid Aït Abderrahim

Weltweit planen mehrere Länder, den Anteil der Kernenergie in ihrem Energiemix erheblich zu steigern, um die Klimaziele zu erreichen. Gleichzeitig gibt es in weiten Kreisen der Bevölkerung erhebliche Bedenken gegen diese Energieform, da sie langlebigen radioaktiven Abfall verursacht. Die Abtrennung und Transmutation verspricht hier eine nachhaltige Lösung durch den Einsatz von sowohl kritischen als auch unterkritischen schnellen Neutronenreaktoren. Letztere verwenden einen Protonenbeschleuniger als externe Neutronenquelle. Mit dem Projekt Myrrha plant Belgien eine Vielzweckanlage, um diese Technologien zu entwickeln.

Der vielleicht wichtigste Aspekt eines nachhaltigen Wachstums, das zukünftigen Generationen Frieden, Freiheit und Wohlstand sichern soll, ist die Energieversorgung und deren Umweltverträglichkeit. Auch wenn es recht unterschiedliche Vorhersagen und Szenarien gibt, darf man doch davon ausgehen, dass sich der weltweite Bedarf an Primärenergie bis 2050 etwa verdoppeln wird. Gleichzeitig gilt es, die Emission der Treibhausgase stark zu reduzieren. Seit Beginn des neuen Jahrtausends ist das Bewusstsein dafür gestiegen, dass eine wissenschaftlich fundierte Energiepolitik den kompletten Lebenszyklus aller (direkt oder indirekt hervorgerufenen) Umweltbelastungen für jedes energieproduzierende System berücksichtigen muss. Im Rahmen der Nachhaltigkeitskriterien gilt es insbesondere, auch den Einsatz von Rohstoffen, die knapp sind oder deren Herstellung viel Primärenergie verlangt, miteinzubeziehen.

Speziell für die Stromerzeugung belegen mehrere Studien die große Attraktivität der Kerntechnik [1, 2]. So zeigt die Auswertung vieler Arbeiten, dass z. B. die CO<sub>2</sub>-Emissionen – diese sind ein guter Indikator für Treibhausgase und auch für den Primärenergieeinsatz – bei Atomstrom zwischen 10 und 130 Gramm pro produzierter Kilowattstunde liegen [3]. Dies ist ein bis zwei Größenordnungen niedriger als bei jeder Form fossiler Energie und auch im Vergleich mit erneuerbaren Energien eher vorteilhaft. (Zur kritischen Diskussion der Daten in [3] siehe [4].)

In diesem Zusammenhang sei auch erwähnt, dass die Europäische Kommission die durch Kernkraft in Europa jährlich vermiedenen CO<sub>2</sub>-Emissionen auf 900 Megatonnen schätzt. Solche Fakten unterstreichen



Auf dem Gelände des belgischen Forschungszentrums SCK-CEN in Mol soll eine Anlage entstehen (hier schematisch eingezeichnet), welche die Grundlagen und Machbarkeit der Transmutation erforschen soll.

unter anderem, dass sich die von der EU angepeilte CO<sub>2</sub>-Reduktion um 20 Prozent nur mit sehr geringer Wahrscheinlichkeit erreichen lässt, ohne den Anteil der Kernkraft im Energiemix deutlich zu vergrößern. Hingewiesen sei hierbei auch auf die sehr ausführliche DPG-Studie, die insbesondere die Rolle der Kernkraft bei der Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emission beleuchtet [5].

Vor diesem Hintergrund sind die umfangreichen internationalen Forschungs- und Entwicklungsprogramme für neue Kernreaktoren der „Generation IV“ verständlich [6]. Wenn diese Technologie voraussichtlich in etwa 30 Jahren industriereif sein wird, würde sie alle Nachhaltigkeitskriterien<sup>1)</sup> erfüllen, eine weiter gesteigerte Sicherheit und Zuverlässigkeit aufweisen

1) Nachhaltigkeit bedeutet hier auch, den gesamten Energieinhalt des in der Natur vorkommenden Urans und der schwereren Elemente, die im Reaktorbetrieb durch Neutroneneinfang erzeugt wurden, auszuschöpfen.

## KOMPAKT

- Die 145 Reaktoren in der EU erzeugen jährlich 2500 Tonnen an abgebranntem Kernbrennstoff. Partitionierung und Transmutation (P&T, Abtrennung und Umwandlung) könnte langfristig 99 % dieses Abfalls vermeiden.
- Ein System aus unterkritischem Reaktor und Neutronenquelle wandelt dabei die Aktinide U, Pu, Am und Cm durch Neutroneneinfang in kurzlebige Isotope um.
- Das in diesem Prozess erbrütete <sup>239</sup>Pu lässt sich in Leichtwasserreaktoren spalten und ist somit kein Abfallprodukt, sondern ein wertvoller Energieträger.
- Die weltweiten Uranreserven reichen nur für ein- bis zweihundert Jahre, durch Recycling mittels P&T aber mehrere Jahrtausende.

Prof. Dr. Alex C. Mueller, Institut National de Physique Nucléaire et de Physique des Particules (IN2P3), CNRS, 75016 Paris, Frankreich und Prof. Dr. Hamid Aït Abderrahim, SCK-CEN, Boeretang 200, 2400 Mol, Belgien



Neutronenverbrauch pro Kernspaltung		
Isotop	Schneller Reaktor	LWR
U-238	-0,62	0,07
Pu-238	-1,36	0,17
Pu-239	-1,46	-0,67
Pu-240	-0,96	0,44
Pu-241	-1,24	-0,56
Pu-242	-0,44	1,76
Np-237	-0,59	1,12
Am-241	-0,62	1,12
Am-243	-0,6	0,82
Cm-244	-1,39	-0,15
Cm-245	-2,15	-1,48

Tab. 2 Neutronenverbrauch pro Kernspaltung (D-Faktor) in einem schnellen bzw. thermischen (LWR) Neutronenspektrum für die wichtigsten Aktiniden [7].

P&T (Abb. 1). Hier wollen wir kurz auf die physikalischen Grundlagen eingehen und ein Szenario mit dem beschleunigergetriebenen System (accelerator-driven system, ADS) vorstellen.

Die Raten, mit denen Transmutationsreaktionen ablaufen, hängen von den Wirkungsquerschnitten der involvierten Kernreaktionen ab (Infokasten „Reaktionsquerschnitte...“). In der Praxis berechnet man aus den Wirkungsquerschnitten den so genannten D-Faktor, der den Neutronenverbrauch pro Kernspaltung angibt. Ist er negativ, so entsteht im Spaltprozess ein Neutronenüberschuss und der Prozess kann sich selbst aufrecht erhalten. Beim „klassischen“ Leichtwasserreaktor mit dem moderierten thermischen Neutronenspektrum sind viele D-Werte positiv, sodass sich die entsprechenden langlebigen radiotoxischen Aktiniden anhäufen, da ihre Spaltung nicht selbstständig abläuft (Tab. 2). Dieser Reaktortyp kann eher nur einen kleinen Teil der Plutoniumisotope verwerten, im Wesentlichen <sup>239</sup>Pu. Im nicht-moderierten, „schnellen“ Neutronenspektrum sind hingegen alle D-Werte negativ, sodass sich alle Aktiniden vollständig in Spaltprodukte um-

wandeln. Ein Teil der vorgeschlagenen Generation-IV-Reaktoren arbeitet daher mit dem schnellen Spektrum und vernichtet den eigenen Abfall im Betrieb sozusagen automatisch.

Aus grundsätzlichen Sicherheitsgründen – schlechte Reaktivitätskoeffizienten, Mangel an verzögerten Neutronen – ist es allerdings nicht möglich, schnelle kritische Reaktoren mit einem hohen Anteil an so genannten minoren Aktiniden (MA: alle außer U und Pu) im Brennstoff – insbesondere Am und Cm – zu entwickeln. Daher rührt die Idee, die Abfälle, welche die heute betriebenen Generation-II-Reaktoren oder die im Bau befindlichen LWR der Generation-III erzeugen, in speziellen unterkritischen Reaktoren zu transmutieren. Die fehlenden Neutronen soll eine zusätzliche externe und steuerbare Quelle liefern. Diese besteht aus einem Protonenbeschleuniger, dessen Strahl auf ein Metalltarget im Reaktorkern fällt. Bei typischen Energien von 0,6 bis 1 GeV erzeugt ein Proton sehr effizient 15 bis 30 Neutronen durch „Spallation“ – die hohe Energie der Protonen regt den Kern eines Targetatoms an und „verdampft“ quasi die Neutronen. Den gleichen Prozess nutzen Spallations-Neutronenquellen.

Dieses „hybride“ Konzept wird als ADS bezeichnet, Accelerator-Driven System. Es produziert deutlich mehr Energie, als zum Betrieb der zusätzlichen Komponenten nötig ist. Abhängig von der gewählten Unterkritikalität bräuhete man etwa 5 % des erzeugten elektrischen Stroms zur Eigenversorgung. Ein ADS wird daher grundsätzlich auch mit Dampferzeuger und Turbinengenerator ausgerüstet sein. So attraktiv ADS für maximale und gleichzeitig sichere MA-Transmutation ist, so fraglich erscheint es allerdings als generelle Alternative zur Elektrizitätsproduktion, und sei es nur auf Grund der Mehrkosten des Beschleunigers und des Spallationstargets. Analog dazu ist es wenig zweckmäßig, den MA-Abfall über einen ganzen

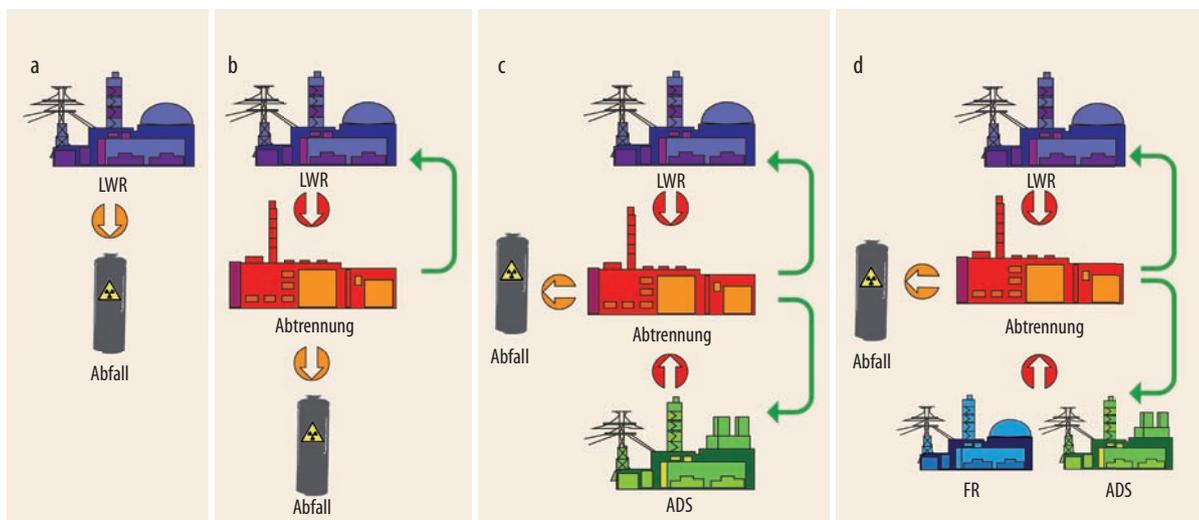


Abb. 1 Die Brennstoffzyklen unterscheiden sich durch den jeweiligen Fluss radioaktiver Materialien. Beim „offenen Zyklus“ findet keine Wiederaufbereitung des abgebrannten Brennstoffs statt (a),

während beim einfachen Recycling, wie heute in Frankreich und Belgien, ein Teil des „erbrüteten“ Plutoniums mit frischem Uran zur Herstellung von Mischoxid-Brennstoff genutzt wird (b). Die in b)

nicht wiederverwerteten Aktiniden werden in einem ADS „verbrannt“ (c). Beim längerfristigen Double-Strata-Szenario verbrennen schnelle kritische Reaktoren (FR) ihre erbrüteten Aktiniden selbst (d).

2) <http://nuklear-server.ka.fzk.de/eurotrans/>

3) Der XT-ADS wird ein eutektisches Blei-Wismut-Kühlgemisch benutzen, das niedrigere Arbeitstemperaturen erlaubt. Allerdings ist diese Lösung industriell nicht nachhaltig, da es keine ausreichenden Materialreserven gibt.

Park von kritischen (schnellen) Reaktoren zu verteilen, die eher zur Plutoniumverbrennung und Elektrizitätsgewinnung optimiert sein sollten.

Man spricht daher auch von einem zweistufigen Brennstoffzyklus („double strata“). Elektrizität oder auch Prozesswärme wird in der ersten Stufe mit „sauberem“ frischem Brennstoff (nur U und Pu) erzeugt, wobei ein Pool schneller Anlagen den LWR-Park langfristig ersetzt. In der zweiten Stufe übernehmen einige ADS – ein Anteil von 10 % wird gelegentlich erwähnt – die Verbrennung von MA und eventuellen Plutoniumrückständen.

### Europäische Projekte

Internationale Organisationen wie die Nuclear Energy Agency der OECD oder die IAEA haben sich mit der Entwicklung von ADS und den nötigen technologischen Komponenten befasst [9, 10]. In Europa haben sich zahlreiche Forschungszentren, Universitäten und Unternehmen im Rahmen von Eurotrans<sup>2)</sup> zusammengeschlossen [11, 12]. Ziel dieses im letzten Frühjahr beendeten Programms war es, ein fortgeschrittenes Design aller Komponenten einer ADS-Demonstrationsanlage (XT-ADS) zu entwickeln sowie ein generisches Design einer modularen bleigekühlten Transmutationsanlage (European Facility for Industrial Transmutation, EFIT).

Das XT-ADS soll innerhalb der nächsten Dekade realisiert werden und daher hauptsächlich herkömmlichen Mischoxid-Brennstoff verwenden, der neben  $UO_2$  ein weiteres Oxid, meist  $PuO_2$  enthält. Die damit verfolgten drei Hauptziele sind, (1) ein Protonenbeschleuniger, ein Spallationstarget und eine subkritische Anlage mit maßgeblicher Leistung im Reaktorkern (50 – 100  $MW_{th}$ ) zu koppeln, (2) die Transmutation von minoren Aktiniden zu validieren und (3) Bestrahlungsexperimente mit schnellen Neutronen insbesondere zur Qualifikation von EFIT-Komponenten zu ermöglichen.

Als industrieller Demonstrator soll EFIT dagegen mit Brennstoff arbeiten, der zur Transmutation

Transmutationsanlagen		
	XT-ADS (ADS Prototyp)	EFIT (Industrieller Transmuter)
Leistung	50 – 100 $MW_{th}$	400 $MW_{th}$
$K_{eff}$	0,95	0,97
Protonenstrahl	600 MeV, 2,5 mA	800 MeV, 20 mA
Brennstoff	Mischoxid („MOX“)	mit hohem MA-Anteil
Kühlmittel und Target	aus eutektischem Pb-Bi	aus Pb

Tab. 3 Wichtige Kenndaten der europäischen Transmutationsanlagen XT-ADS und EFIT

bestimmt ist. Die Wirtschaftlichkeit des Gesamtsystems wird von zentraler Bedeutung sein, die EFIT-Auslegung strebt daher hohe Transmutationsraten und Verfügbarkeit, sowie leichten Betrieb und Wartung an. **Tabelle 3** stellt grundsätzliche Eigenschaften von XT-ADS und EFIT gegenüber, wobei  $K_{eff}$  der „effektive“ globale Neutronenmultiplikationsfaktor ist, auch Kritikalität genannt. Für ein unterkritisches System gilt  $K_{eff} < 1$ .

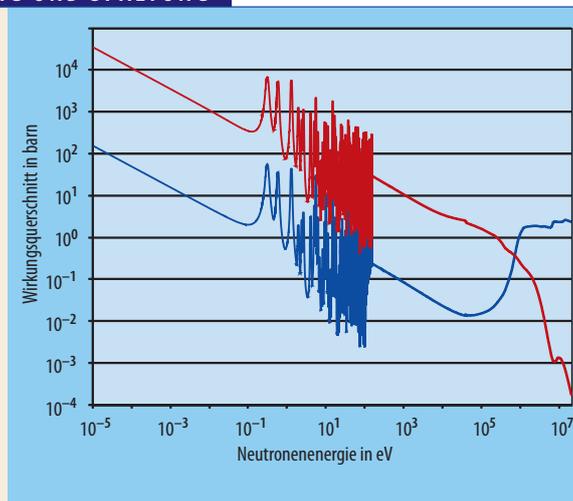
Eurotrans hat bestätigt, dass XT-ADS und EFIT trotz ihrer recht unterschiedlichen Zielsetzungen hinsichtlich der Technologie fundamentale Gemeinsamkeiten haben: Beide benötigen einen supraleitenden Beschleuniger und flüssiges Blei für das Spallationstarget und zur Kühlung des Reaktorkerns.<sup>3)</sup>

### Der Protonenbeschleuniger

Das ADS stellt recht ungewöhnliche Anforderungen an den Beschleuniger, denn der Strahl darf nur äußerst selten ausfallen. Bei einem Ausfall, der länger als etwa eine Sekunde dauert, würde die Temperatur von Target, Reaktorstruktur- und Brennstoffelementen um mehrere hundert Grad absinken. Diese erhebliche thermische Belastung würde nach einigen tausend Wiederholungen zu inakzeptablen Ermüdungserscheinungen, insbesondere der Ummantelungen der Brennstoffstäbe führen. Nach ausführlichen thermo-

### REAKTIONSQERSCHNITTE FÜR NEUTRONENEINFANG UND SPALTUNG

In welchen Mengen die Kernreaktionen (vgl. Infokasten „Wie entstehen die Aktiniden?“) wirklich verschiedene Isotope „erbrüten“ (oder vernichten), bestimmen insbesondere die Wirkungsquerschnitte für Neutroneneinfang und für neutroneninduzierte Spaltung. Diese hängen stark von der Neutronenenergie ab, wie hier am Beispiel von  $^{241}Am$  gezeigt. Bis zu einer Energie von knapp 1 MeV ist hier der Querschnitt für Neutroneneinfang (rot), der zunächst  $^{242}Am$  erzeugt, zwei Zehnerpotenzen größer als für die Spaltung (blau). Erst bei noch schnelleren Neutronen überwiegt dann der Spaltprozess mit etwa konstantem Wert, während der Einfang verschwindet. Aus solchen Querschnitten für alle beteiligten Kerne und unter Berücksichtigung der Zerfallsreaktionen lässt sich der D-Faktor für ein bestimmtes Isotop berechnen. Dieser „Neutronenverbrauchsfaktor“ gibt die benötigte Anzahl von Neutronen an, um dieses Isotop durch Spaltung zu transmutieren.



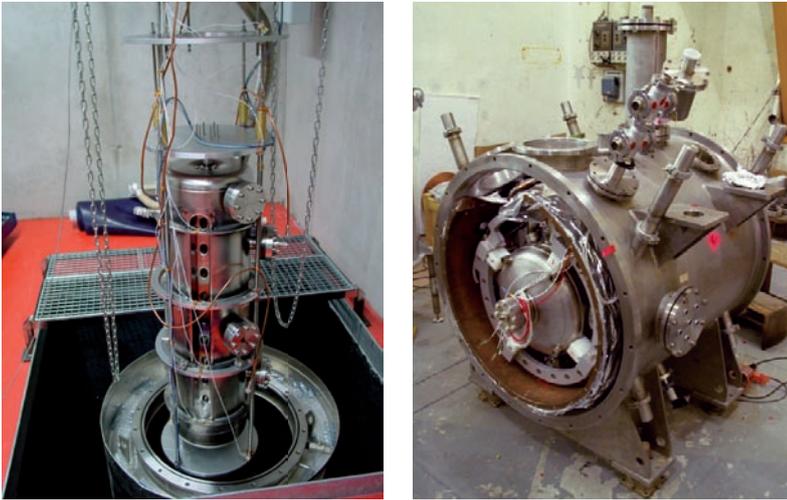


Abb. 2 Die an der Universität Frankfurt (links) bzw. am IPN Orsay (rechts) entwickelte Kavitäten in ihrem jeweiligen vertikalen Kryostaten bzw. horizontalen Kryomodul.

hydraulischen Simulationen gelten fünf Ausfälle im Vierteljahr für XT-ADS und drei Ausfälle pro Jahr für EFIT als Richtwert. Die „einfacheren“ Anforderungen an XT-ADS ergeben sich aus den alle Vierteljahr vorgesehenen Wartungs- und Neuladungsperioden.<sup>4)</sup>

Dieses sehr strenge Zuverlässigkeitskriterium, und auch der sehr hohe Strahlstrom für EFIT, lassen sich nur mit Linearbeschleunigern (Linac) im Dauerstrichbetrieb erfüllen, da die intrinsischen Grenzen eines Linac hinsichtlich Strahlstrom und Energie noch mehr als eine Größenordnung höher liegen. Dagegen sind für ein Zyklotron die Grenzwerte bei XT-ADS erreicht und für EFIT<sup>5)</sup> überschritten. Weiterhin kann ein Kreisbeschleuniger, der ja effizient dieselben wenigen Komponenten zur Beschleunigung nutzt, prinzipiell nicht extrem zuverlässig sein. Im Gegensatz dazu ermöglicht nur ein sehr modularer Beschleuniger mit vielen identischen Komponenten, die jeweils nur einmal an der Beschleunigung teilnehmen und deutlich unter ihrer Grenzleistung arbeiten, eine konzeptuelle Toleranz gegenüber Fehlfunktionen. Fällt z. B. eine Beschleunigerkavität aus, so lassen sich die benachbarten Kavitäten so nachregeln, dass der Protonenstrahl bis zur Reparatur nicht ausfällt. Weiterhin sollten, wenn immer nötig und möglich, Komponenten redundant sein. Eine europäische Kollaboration mit einem der Autoren als Koordinator hat ein solches Beschleunigerkonzept ausgearbeitet [13]. Es basiert auf einem supraleitenden Linac.

Inzwischen haben Simulationen ergeben, dass die geforderte Zuverlässigkeit erreichbar ist, auch wenn sie eine bis drei Größenordnungen über der von typischen, in der Grundlagenforschung betriebener Beschleuniger, liegt.<sup>6)</sup> Auch sind erste Tests von Prototypen der Komponenten (Abb. 2), die in Frankfurt, Mailand, Saclay und Orsay gebaut wurden, erfolgreich verlaufen [14]. Diese Arbeiten setzt das neue Euratom-Projekt „Max“ fort.

### Das Myrrha-Projekt in Belgien

Am belgischen Kernforschungszentrum SCK-CEN begannen 1998 Studien für ein komplettes ADS, das sich auf industrielle Anwendungen extrapolieren lässt, mit

einem breit gefächerten F&E-Programm. Dieses Myrrha-Projekt<sup>7)</sup> soll folgende Eigenschaften aufweisen:

- eine hohe Flussrate schneller Neutronen, um effizient die Transmutation von Abfall mit hoher Toxizität zu untersuchen,
- eine hohe integrale Neutronenflussrate zur Entwicklung von Brennstoff für neue, innovative Reaktoren,
- einen hochenergetischen schnellen Fluss in einem Bestrahlungsvolumen von etwa drei Litern zur Entwicklung neuer Werkstoffe für sowohl die Fissions- als auch die Fusionstechnologie.
- Ferner sollen sich damit auch Radioisotope und Radiopharmaka herstellen lassen.

SCK-CEN schlug Myrrha im April 2005 als Basisdesign für das XT-ADS vor. Ziel ist heute, es in den kommenden Jahren in Mol zu bauen. Diese neue Infrastruktur würde dort Europas ersten Forschungsreaktor, den BR2 (100 MW<sub>th</sub>) ersetzen und die Zukunft des Forschungszentrums langfristig sichern.

In ihrer „Strategic Research Agenda“ identifiziert die „Sustainable Nuclear Energy Technology Platform“ Myrrha/XT-ADS als einen Eckpfeiler der zukünftigen europäischen Forschungsvorhaben [6]. Das (konsolidierte) Gesamtbudget beträgt 960 Millionen Euro.

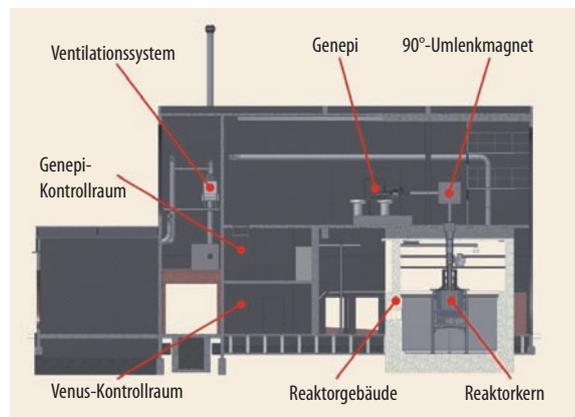


Abb. 3 Das Guinevere-Experiment am SCK-CEN im belgischen Mol enthält den Reaktor Venus und die Neutronenquelle Genepi (Générateur de neutrons pulses intenses), die vom CNRS-IN2P3-LPSC entwickelt wurden und auf einem elektrostatischen Deuteronenbeschleuniger beruhen.

4) Eine gewisse Lockerung dieser Werte werden von der gerade begonnenen FP7 EURATOM Studie CDT erhofft

5) Gleiches gilt für den Strahlstrom bei FFAG-Beschleunigern, da diese ein deutlich niedrigeres Tastverhältnis als die beim Zyklotron möglichen 100 % haben.

6) Die europäische Synchrotronstrahlungsquelle ESRF in Grenoble liefert sehr häufig für eine Woche ununterbrochen einen Strahl und läuft inzwischen sogar schon einen ganzen Monat ohne (ungewollte) Strahlunterbrechung (P. Ellau-me, persönl. Mitteilung).

7) Multi-purpose hybrid research reactor for high-tech applications; vgl. Physik Journal März 2010 S. 10.

Im März 2010 beschloss die belgische Regierung, 40 Prozent der Kosten zu übernehmen. Insbesondere stellt Belgien 60 Millionen Euro für die Jahre 2010 bis 2014 bereit. Dieser Betrag enthält u. a. alle weiteren notwendigen F&E-Ausgaben. Im selben Zeitraum gilt es, die Gesamtfinanzierung mit den Konsortialpartnern (andere Länder und Forschungsinstitutionen, Industrie, Investmentbank und EU) sicherzustellen.

Mit dieser Planung werden Ausschreibungen und Lieferverträge 2015 beginnen, wobei für die Komponentenherstellung und die Baumaßnahmen ab 2016 rund drei Jahre vorgesehen sind. Nach dem Aufbau der Gesamtanlage im Jahr 2019, einer dreijährigen Testphase und einem weiteren Jahr, um die Leistung graduell zu steigern, wird ab 2024 der Experimentierbetrieb mit nominellen Parametern möglich sein.

### Ein Modellexperiment

Im Rahmen von Eurotrans ist in Mol auch die Anlage Guinevere (Generator of Uninterrupted Intense Neutrons at the lead Venus Reactor, **Abb. 3**) entstanden [15]. Dazu wurde der Venus-Reaktor in einer Zusammenarbeit von SCK-CEN, CEA und CNRS-IN2P3 in ein schnelles System mit externer Neutronenquelle umgebaut. Der Kern besteht jetzt aus angereichertem Uran mit einem Bleirefektor. Ein Kühlsystem ist nicht nötig, da die Leistung deutlich unter einem Kilowatt bleibt. Die Genepi-Neutronenquelle lässt sich sowohl gepulst als auch kontinuierlich betreiben. Damit sind Experimente möglich, die nicht nur ganz generell verschiedene Aspekte der ADS-Technologie erproben sollen – wie Brennstoffbeladung und Subkritikalität, Anschaltprozeduren und on-line-Bestimmung der Reaktivität, normale und Not-Abschaltprozeduren etc. –, sondern auch für das spätere Betriebsgenehmigungsverfahren von Myrrha/XT-ADS essenziell sind. In diesem Frühjahr haben die belgische Regierung und die französischen Partner Guinevere eingeweiht. Die Experimente sollen noch in diesem Jahr in einem breiten subkritischen Bereich beginnen.

### Ausblick

Wir hoffen, in diesem Beitrag gezeigt zu haben, dass die physikalischen Grundlagen zu einer nachhaltigeren Nutzung der Kernenergie bekannt sind. Die Lösung des Atommüll-Problems ist dank der weiten europäischen Zusammenarbeit von Forschungsinstituten, Universitätsgruppen und industriellen Partnern in vollem Gang. Mit Belgiens Standortentscheidung für Myrrha sind die Weichen für ein Demonstrationsprojekt eines unterkritischen, beschleunigergetriebenen Kernreaktors gestellt. Die Möglichkeiten von Myrrha – einem Projekt der ESFRI-Liste künftiger Großforschungsanlagen in Europa – sind sehr breit angelegt und versprechen neben der Erforschung der Transmutation von radioaktivem Abfall auch großen

Fortschritt in anderen wichtigen Gebieten, die von der Materialforschung bis zur Medizin reichen.

\*

Wir danken an dieser Stelle der Europäischen Kommission und allen beteiligten Kollegen in den Projekten PDS-XADS, Eurotrans, Pateros und CDT.

### Literatur

- [1] A. Voss, in: Externalities and Energy Policy: The Life Cycle Analysis Approach (2001), S. 163, <http://www.nea.fr/ndd/reports/2002/nea3676-externalities.pdf>
- [2] R. Dones, T. Heck und S. Hirschberg, in: Encyclopedia of Energy, Bd. 3, Academic Press/Elsevier, San Diego, USA (2004), S. 77, [vgl. http://gabe.web.psi.ch/research/lca/](http://gabe.web.psi.ch/research/lca/)
- [3] M. Bilek et al., Life-Cycle Energy Balance and Greenhouse Gas Emissions of Nuclear Energy in Australia, (2006); [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)
- [4] Commonwealth of Australia, Uranium Mining, Processing and Nuclear Energy (2006), [www.ansto.gov.au/\\_data/assets/pdf\\_file/0005/38975/Umpner\\_report\\_2006.pdf](http://www.ansto.gov.au/_data/assets/pdf_file/0005/38975/Umpner_report_2006.pdf)
- [5] Klimaschutz und Energieversorgung in Deutschland 1990–2020 (2005), [www.dpg-physik.de/static/info/klimastudie\\_2005.pdf](http://www.dpg-physik.de/static/info/klimastudie_2005.pdf)
- [6] Strategic Research Agenda, Report May 2009 of the Sustainable Nuclear Energy Technology Platform, [www.snetp.eu/www/snetp/images/stories/Docs-AboutSNETP/sra2009.pdf](http://www.snetp.eu/www/snetp/images/stories/Docs-AboutSNETP/sra2009.pdf)
- [7] C. Rubbia et al., The European Roadmap for Developing ADS for Nuclear Waste Incineration (2001), [www.enea.it/com/ingl/New\\_ingl/publications/ads.html](http://www.enea.it/com/ingl/New_ingl/publications/ads.html)
- [8] Deliverables of the European Contract PATEROS, [www.sckcen.be/pateros](http://www.sckcen.be/pateros)
- [9] R. Sheffield et al., Accelerator and Spallation Target Technologies for ADS Applications (2005), [www.nea.fr/science/docs/pubs/nea5421-accelerator.pdf](http://www.nea.fr/science/docs/pubs/nea5421-accelerator.pdf)
- [10] z. B. [www.iaea.org/inisnkm/nkm/aws/fnss/](http://www.iaea.org/inisnkm/nkm/aws/fnss/) und dortige Links
- [11] J. U. Knebel et al., EUROTRANS (2007), [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)
- [12] EUROTRANS, Euratom FP 6 contract FI6W-CT-2005-516520, <http://nuclear-server.ka.fzk.de/eurotrans>
- [13] A. C. Mueller, Radiation Protection Dosimetry 116, 442 (2005)
- [14] J-L. Biarrotte et al., Accelerator R&D for the European ADS Demonstration, [www.srf.mi.infn.it/publications/papers/2009/files/tu2rai02.pdf](http://www.srf.mi.infn.it/publications/papers/2009/files/tu2rai02.pdf)
- [15] A. Billebaud et al., The GUINEVERE Project for Accelerator Driven System Physics (2009) [www.sckcen.be/en/Our-Research/Research-projects/Internal-projects/MYRRHA](http://www.sckcen.be/en/Our-Research/Research-projects/Internal-projects/MYRRHA)

### DIE AUTOREN

**Alex C. Mueller** (FV Hadronen und Kerne) hat in Mainz Physik studiert und 1982 nach einem vierjährigen Aufenthalt am Genfer CERN promoviert. 1985 habilitierte er sich in Caen, Frankreich. Seit 1982 arbeitet Mueller als Kern- und Beschleunigerphysiker in verschiedenen Labors der französischen Forschungsorganisation CNRS, mittlerweile als Deputy Director des IN2P3 in Paris.



**Hamid Ait Abderrahim** hat 1983 ein Ingenieurstudium an der Universität Brüssel abgeschlossen, 1984 den Master, und 1990 in Reaktorphysik an der Universität Orsay promoviert. Seitdem hatte er verschiedene Stellen in Reaktortechnologie und Reaktordesign am Belgischen Kernforschungszentrum SCK-CEN inne. Heute ist Abderrahim Direktor des Advanced Nuclear Systems Institute des SCK-CEN und Professor für Nuclear Engineering an der Universität in Louvain-la-Neuve (UCL) in Belgien.

