

Transmutation von Actinoiden als Beispiel für Sustainable Goofiness

von

J. Peter Hosemann

Freiburg, 12. 2. 2013



Nach der Auflösung des von mir geleiteten Labors für Sicherheits- und Unfallforschung im Jahr 2000 war ich Bevollmächtigter für Sicherheitsforschung im Bereich "Nukleare Energieforschung und Sicherheit" des Paul Scherrer Instituts (PSI). Zugleich war ich Programmleiter "Kerntechnik und Nukleare Sicherheit" des Eidgenössischen Bundesamtes für Energie (BFE), welches das Kompetenzzentrum für Fragen der Energieversorgung und der Energienutzung im Eidgenössischen Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK ist. Bis zu meiner Pensionierung Ende des Jahres 2003 gehörte ich der Forschungskommission des PSI an.

Das *Paul Scherrer Institut* (PSI) ist das grösste Forschungszentrum für Natur- und Ingenieurwissenschaften in der Schweiz, beschäftigt rund 1500 Personen und verfügt ohne Drittmittel für Auftragsforschung über ein jährliches Budget von rund 365 Millionen Schweizer Franken. Das PSI wird zum grössten Teil von der Schweizerischen Eidgenossenschaft finanziert und ist Teil des ETH-Bereichs, dem auch die *ETH Zürich* und die *ETH Lausanne* angehören sowie die Forschungsinstitute *Eidgenössische Anstalt für Wasserversorgung, Abwasserreinigung und Gewässerschutz* (Eawag), *Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt* (Empa) und *Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft* (WSL). Das PSI befindet sich im Kanton Aargau auf dem Gebiet der Gemeinden Villigen und Würenlingen, auf beiden Seiten der Aare. Seine Forschungsschwerpunkte sind *Materie und Material, Energie und Umwelt*, sowie *Mensch und Gesundheit*. Das PSI betreibt mit der *Neutronenquelle* (SINQ), der *Synchrotron Lichtquelle Schweiz* (SLS) und der *Myonenquelle* (S μ S) wissenschaftliche Grossanlagen, die aussergewöhnliche Einblicke in die Vorgänge im Inneren verschiedener Stoffe und Materialien bieten. Diese Anlagen sind in der Schweiz einzigartig, Einzelne gibt es weltweit nur am PSI. Im Jahr 2016 soll am PSI die nächste Grossanlage in Betrieb gehen: der *Freielektronen-Röntgenlaser* (SwissFEL) (*FEL = Free Electron Laser*). Er wird extrem kurze und intensive, nur 20 bis 60 Femtosekunden lange Blitze aus Röntgenlicht in Laserqualität erzeugen. Diese Eigenschaften werden neuartige Einblicke in das Innere von Materialien, die mit den Röntgenblitzen durchleuchtet werden, erlauben. Im Rahmen eines Benutzerdienstes stehen Arbeitsmöglichkeiten an den Grossanlagen auch Forschenden von Universitäten, anderen Forschungszentren und der Industrie zur Verfügung. Da die Nachfrage nach Messzeit in der Regel das Angebot bei Weitem übersteigt, wählt eine Kommission, bestehend aus Fachleuten aus mehreren Ländern die besten Anträge aus. Im Jahr 2011 haben über 2300 externe Forscher Messungen an den rund 40 Messplätzen der PSI-Grossanlagen durchgeführt.

Um die Jahrtausendwende hatte ich als Vertreter der Schweiz in zahlreichen internationalen Komitees und Project Boards im Zusammenhang mit der Reaktorsicherheitsforschung Einsitz und begann an der Relevanz mancher großer internationaler Projekte zur Kernenergienutzung für die Gesellschaft zu zweifeln. Keinen Zweifel hege ich bis heute daran, dass der Versuch der Nutzbarmachung der Kernenergie eine wissenschaftlich-technische Großtat der Menschheit war, der durch die geschürte Angst entscheidend behindert und verzögert und schließlich postponiert

worden ist. Schon in den 1970er Jahren hatte dies Helmut Schmidt in der Öffentlichkeit durch den „Bürgerdialog Kernenergie“ vergeblich zu verhindern versucht. Allerdings hatte er damals noch gedacht, man könne das Volk mit rationalen Argumenten aufklären und zu vernünftig politischem Handeln befähigen. Schon um die Jahrtausendwende wurde deutlich, dass die Blüte der Kernenergienutzung frühestens im Jahr 2030 einsetzen wird. Was aber kümmert mich die Blüte der Kernenergienutzung in zwanzig Jahren, die zudem nur im Ausland stattfindet?

Da hatte ich mich viele Jahre lang zum Experten für Reaktorsicherheit entwickelt, um dann feststellen zu müssen, dass die auf Arbeitsteilung ausgerichtete Gesellschaft des technischen Zeitalters in Deutschland überhaupt nicht funktioniert. Plötzlich war ich der Feind von Müttern, die um das Leben ihrer radioaktiv verseuchten Kinder zitterten. Bedenkenträger in Latzhosen waren mir überlegen, denn sie kannten die Schwachstellen von Reaktoren, die sie an Öko-Instituten studiert hatten, genau. Nicht einmal auf eine gemeinsame Nomenklatur konnte man sich einigen. Die Menschheit ist mit ihrer – um einmal einen neuerdings viel gebrauchten Begriff nachzuplappern – „Schwarmintelligenz“ längst nicht mehr in der Lage, politisches Wollen allgemeinverständlich und richtungweisend zu formulieren. Man gibt sich einer Technikverdrossenheit hin und demonstriert Misstrauen gegen Expertentum. Dennoch geht man aber davon aus, als habe man das technische Prinzip der Sachzwänge bereits gegen das Prinzip eingetauscht, gesellschaftliche Veränderungsprozesse durch zweckmäßiges Handeln zu verwirklichen. Ich glaube, wir werden noch viel Lehrgeld für falsche energiepolitische Entscheidungen zahlen müssen. Wie bereits gesagt, stehen dann am Ende weltweit, aber außerhalb von Deutschland, die neuen Prototypen der Höchsttemperatur-Reaktoren des Generation IV International Forum.

Im Jahr 1983 gründeten die Vereinten Nationen als unabhängige Sachverständigenkommission die Weltkommission für Umwelt und Entwicklung (WCED = World Commission on Environment and Development) mit Sekretariat in Genf. Ihr Auftrag war die Erstellung eines Perspektivberichts zu langfristig tragfähiger, umweltschonender Entwicklung im Weltmaßstab bis zum Jahr 2000 und darüber hinaus. Die Vollversammlung der UNO forderte von der Kommission an erster Stelle: „to propose long-term environmental strategies for achieving sustainable development by the year 2000 and beyond;“ Die Sachverständigenkommission setzte sich aus 19 Bevollmächtigten aus 18 Ländern weltweit zusammen: Zur Vorsitzenden wurde die frühere Umweltministerin und damalige Ministerpräsidentin von Norwegen, Gro Harlem Brundtland (seit 1998 Generaldirektorin der Weltgesundheitsorganisation WHO), gewählt. Das Mitglied aus Deutschland war Volker Hauff. Seit 1988 wechselt der Vorsitz jährlich. Der Abschlussbericht der Brundtland-Kommission war sehr umfangreich*. Auf dem Bucheinband heisst es: *„Unsere gemeinsame Zukunft zeigt, dass die Zeit gekommen ist, Ökonomie und Ökologie zusammenzubringen, so dass die Regierungen und die Menschen Politiken für eine dauerhafte Entwicklung für unseren Planeten entwickeln können. Die Botschaft dieses Berichts lautet: Wir müssen handeln, jetzt! Dieser Bericht ist das wichtigste Dokument dieses Jahrhunderts für die Zukunft unserer Welt.“* Tatsächlich wurde in der Folge aber auch eine bis heute noch nicht abgeblasene geistige Blähung verursacht, die tatsächlich nachhaltig wirkt. „Sustainable Development“ wurde zum Zauberwort. Wer Forschungsgelder zugesprochen bekommen wollte, musste sein Forschungsprogramm unter der Flagge „Nachhaltigkeit“ durchführen. Es wurden Gruppen von Spezialisten eingestellt, die nichts anderes zu tun hatten, als in die Beschreibungen von Forschungsprogrammen, in die Leitlinien von Großforschungszentren und in gutachterliche Stellungnahmen möglichst oft ein „nachhaltiges“ Ziel hineinzuschreiben. Alles muss auch heute noch ökologisch-sozial-ethisch-nachhaltig sein. Dass Menschen Verantwortung für ihre Mitmenschen tragen sollen, ist ein Gebot, älter als die Bibel. Aber was berechtigt zu diesem Imperativ? Es ist ja noch längst nicht zweifelsfrei geklärt, ob der Mensch von Natur aus gut ist und durch Sozialisation böse wird, oder ob sich das gerade umgekehrt verhält. Dass die Menschen der Forderung nach

* http://www.bne-portal.de/coremedia/generator/unesco/de/02__UN-Dekade_20BNE/01__Was_20ist_20BNE/Brundtland-Bericht.html

gegenseitiger Verantwortung fast nie entsprechen können, ist auch nicht neu. Trotzdem ist es heute schon längst zu einer Selbstverständlichkeit geworden, dass man Menschen nicht nur Pflichten gegen ihresgleichen, sondern gegenüber der ganzen Menschheit zumutet. Von welchem moralischen Podest herab wird eigentlich von uns heutigen da unten Verantwortung für die glänzende Zukunft der Menschheit gefordert? Die Ethik des Menschen wird tatsächlich mit der Zukunft der Menschheit überfrachtet. Das Prinzip Verantwortung ist im Kern eine Ethik der Furcht vor unserer eigenen Macht geworden (behauptet wenigstens Norbert Bolz, 1997). Eine Angstkultur soll das naturwissenschaftlich-technische Wissen der Gegenwart vermenschlichen. Furcht wird zur ersten Bürgerpflicht. Wer Furcht artikuliert, ist verantwortungsbewusst. Und das ist eine erfolgreiche Immunstrategie für öffentliche Diskussionen, denn die Angstrhetorik ist unwiderlegbar. Deshalb wird der Diskurs des Prinzips Verantwortung nicht enden und deshalb lassen sich die Nachredner der Nachhaltigkeit auch nicht durch Argumente stoppen. Das Sinnproblem entsteht durch die ethische Unausdeutbarkeit der Welt. Doch statt nun auf ethische Deutungen zu verzichten, wird diese Moralferne unserer Gesellschaft zur Last gelegt. Damit lenkt man erfolgreich von den eigentlichen Problemen, nämlich von den Strukturproblemen der Gesellschaft ab - heute bevorzugt unter dem Stichwort „Solidarität“. Mir gänzlich unverständlich ist, wie dieselben Leute Verantwortung für das Wohlergehen kommender Generationen einfordern können, ohne sich dabei mit demselben Echauffement dagegen aufzulehnen, dass von den derzeit lebenden Menschen rund 870 Millionen, etwa jeder achte, weltweit nachhaltig an Hunger leiden. Nachhaltige Blödheit, Sustainable Goofiness!

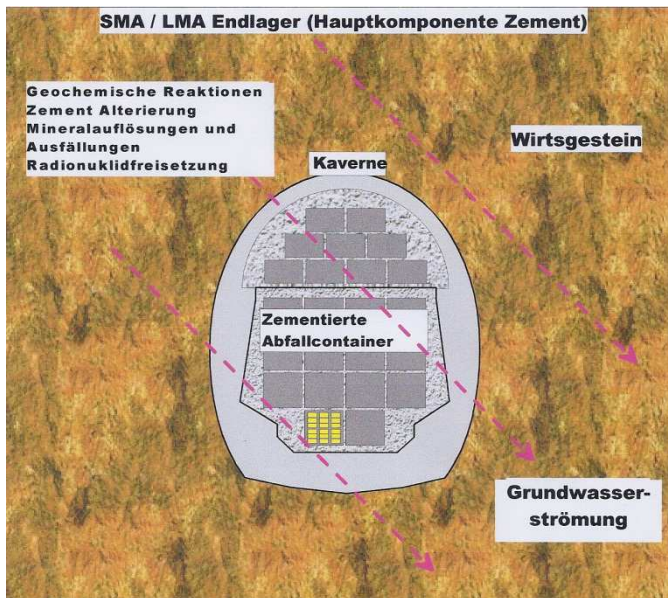
Es war selbstverständlich, dass die sustainable goofiness vor der Kernenergienutzung nicht halt machte. Sofort waren die Kernenergiebefürworter und die Gegner zur Stelle um dem Publikum zu erklären, welche Energieform nachhaltig und welche nicht nachhaltig sei. Das Publikum hatte gar nicht danach gefragt. Die Argumentation auf beiden Seiten strotzte vor sustainable goofiness.

So erklärten z. B. die Gesundheitsbetreuer (Schweizer Kernfachleute): „Radioaktive Abfälle, die einzigen "Schadstoffe", die ein Kernkraftwerk erzeugt, haben den grossen Vorteil, dass ihre schädliche Wirkung, nämlich die radioaktive Strahlung, mit fortschreitender Zeit ganz von alleine abklingt. Bei chemischem Sondermüll beispielsweise ist dies nicht der Fall! Ausserdem sind die Mengen hochradioaktiver Abfälle aus einem Kernkraftwerk sehr klein, ca. eine halbe Telefonkabine voll pro Kernkraftwerk und Jahr. Der Forderung nach nachhaltigem Verhalten wird viel besser entsprochen, wenn die Brennstäbe wiederaufgearbeitet werden. Die Brennstoffausnutzung kann dadurch erhöht und die Abfallmenge verringert werden. Wiederaufarbeitung ist nichts anderes als Recycling und Reduzierung der Abfallstoffe. Dies ist im Sinne der Nachhaltigkeit.“

Greenpeace als Sprecherin der Bedenkenräger argumentiert anders: „Obwohl er meist als "nachhaltige" Energie aus quasi unerschöpflichen Quellen verkauft wird ist Atomstrom alles andere als nachhaltig. Uran ist, anders als die regenerativen Energien, eine begrenzte Ressource. Die Förderung im Tagebau wird schon jetzt immer aufwendiger da mittlerweile auch Minen mit immer niedrigerem Urangehalt ausgebeutet werden. Die lange Halbwertszeit des strahlenden Atommülls von vielen Tausend Jahren hinterlässt den kommenden Generationen gewaltige ungelöste Probleme, mit Nachhaltigkeit hat das nichts zu tun.“

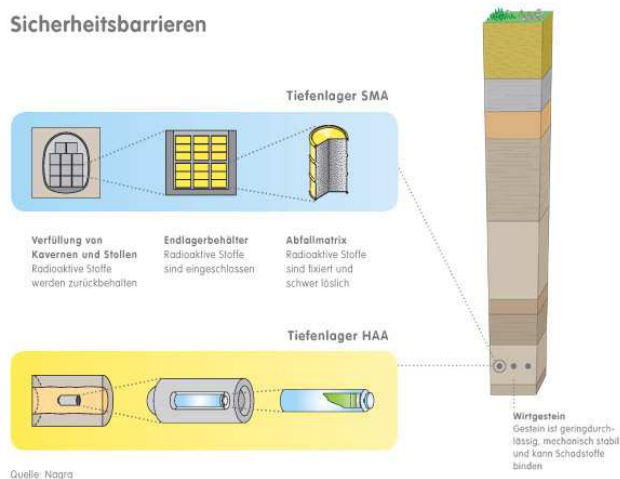
Das Niveau der öffentlichen Kernenergie-Nachhaltigkeits-Debatte war erschütternd niedrig, wie auch die Beispiele oben zeigen. Jetzt traten, praktisch unbemerkt von der Öffentlichkeit, die international untereinander verflochtenen Großforscher mit ihren Staatsbudgets auf den Plan und versuchten ihre Sustainability-Drachen steigen zu lassen (OECD, NEA, CSNI, Euratom, US-NRC, KAERI, JAERI, IAEA, usw.). Über ein Beispiel will ich hier berichten: über die Forschung zur Actinoidentransmutation mit Hilfe von ADS (accelerator driven systems). Es ist zugleich ein besonders ärgerliches Beispiel für *sustainable goofiness*. Um es zu erklären, möchte ich ein paar Dinge über die Endlagerung hochaktiver langlebiger radioaktiver Abfälle festhalten, die offenbar nie in das Bewusstsein der Öffentlichkeit gedrungen sind. Diese kann sich offenbar

nicht vorstellen, wie man die Sicherheit eines Endlagers beurteilen kann und welches Wissen dafür erarbeitet werden muss. Ich beziehe mich dabei auf die Gegebenheiten in der Schweiz, weil diese mir vertrauter sind als es die endlagerpolitische Komödie in Deutschland ist.



Radioaktive Abfälle könnte man entweder verdünnen und verteilen (z. B. Abgase) oder konzentrieren und einschliessen, um Strahlenschäden zu vermeiden. Die Grundidee zur Behandlung radioaktiver Abfälle ist aber praktisch die unterirdische Endlagerung in geologischen Tiefenlagern. Radioaktive Moleküle sollen dadurch an ihrer Verteilung in der Geo- und vor allem in der Biosphäre gehindert werden. Durch den Zerfall der radioaktiven Atomkerne, der Ursache der Strahlung ist, nimmt deren Anzahl stetig ab und somit auch die Intensität der Strahlung. Nach einer „gewissen Zeitdauer“ ist die mögliche Strahlenexposition auf einem unbedenklichen Niveau. Diese Zeitdauer kann je nach Abfallsorte

sehr lang sein. Bei hochaktiven Abfällen vergehen Hunderttausende von Jahren, bevor die Abfälle



bezüglich Strahlung z.B. mit natürlichen Uranerzen vergleichbar werden. Die Strahlung der natürlichen Uranerze ist allerdings nicht so gering, dass keine Vorsichtsmassnahmen nötig wären. Über die langen Zeiträume der angestrebten Isolation der radioaktiven Abfälle in einem Tiefenlager (bis Millionen von Jahren) ist ein vollständiger Einschluss der radioaktiven Stoffe nicht möglich und auch nicht nötig. Das realistische und hinreichende Ziel ist es, dafür zu sorgen, dass die mögliche Strahlenexposition aus den in den Lebensraum des Menschen freigesetzten radioaktiven

Stoffen im Vergleich zur natürlich vorhandenen Strahlenexposition klein bleibt. Es wird

| | | | | | | | | | | | | | | |
|-----------|-----------|-----------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 89 | 90 | 91 | 92 | 93 | 94 | 95 | 96 | 97 | 98 | 99 | 100 | 101 | 102 | 103 |
| <u>Ac</u> | <u>Th</u> | <u>Pa</u> | <u>U</u> | <u>Np</u> | <u>Pu</u> | <u>Am</u> | <u>Cm</u> | <u>Bk</u> | <u>Cf</u> | <u>Es</u> | <u>Fm</u> | <u>Md</u> | <u>No</u> | <u>Lr</u> |

Actinoide: Actinium, Thorium, Protactinium, Uran und die Transurane Neptunium, Plutonium, Americium, Curium, Berkelium, Californium, Einsteinium, Fermium, Mendelewium, Nobelium und Lawrencium. Plutonium und Uranium werden auch major actinides und die anderen Actinoide minor actinides genannt.

diskutiert, ob abgebrannte Brennelemente von Kernkraftwerken nicht auch direkt ohne Wiederaufarbeitung endgelagert werden sollten. Vielen Befürwortern wäre das sympathischer als das Abtrennen des hochaktiven langlebigen Abfalls, der überwiegend aus den Transuranen bzw. Actinoiden besteht (frühere Bezeichnung: Actiniden). Andererseits können durch die Wiederaufarbeitung noch unverbrauchter Brennstoff und Natururan, sowie Plutonium zurückgewonnen werden, die man zu Pu/U-Mischoxid-Brennstofftabletten verarbeiten kann, um sie weiter in Reaktoren einzusetzen. Das wird heute bereits so gemacht und hat sich bewährt. Auch hier wird unüberlegt mit

„Nachhaltigkeit“ geworben: Natürlich wird die Möglichkeit der Proliferation von Pu verringert, wenn man es im Reaktor verbrennt.

Aber die moralische Forderung von Nachhaltigkeit hat keine andere ethische Qualität als die Forderung die Proliferation zu unterlassen. Nach einigen wenigen Wiederaufarbeitungszyklen sind die neu gewonnenen Brennelemente durch radioaktive Verunreinigungen in den Pellets nicht mehr handhabbar, was den Ausnutzungsgrad immer noch stark einschränkt. Der hochaktive langlebige Abfall wird in Blöcken verglast. Aufgrund der hohen Aktivität von mehr als 10^{14} Bq pro m^3 wird erhebliche Zerfallswärme produziert (typisch 3 bis 20 kW pro m^3). Die Glasblöcke werden in Stahlfässer einbetoniert. Die Stahlfässer werden dann im Endlager in ausbetonierte Kavernen eingelagert, die mit Betonit oder anderen Tonarten dicht ausgekleidet werden. Die Fässer sollen rückholbar sein.

Während die Idee, Abfälle irgendwo ohne detailliertes Wissen zu vergraben, nicht neu ist und leider auch praktiziert wurde, besteht hinsichtlich radioaktiver Abfälle in der Schweiz die feste Absicht, sie unterirdisch in massivem Wirtgestein zu lagern und dabei so viel Wissen im Vorhinein zu sammeln, dass man guten Gewissens davon ausgehen darf, dass die radioaktiven Substanzen über sehr lange Zeit gerade dort verbleiben werden, wo sie eingelagert wurden, bzw. dass nur so viel wieder in die Biosphäre gelangt, dass es für diese unschädlich ist. Die Gesellschaft in der Schweiz wird aber fordern, dass der Sicherheitszustand eines Endlagers permanent auf der Basis der jeweils neusten Erkenntnisse überprüft wird. Dafür wird auch nach der Errichtung eines Endlagers eine fortwährende wissenschaftliche Beurteilungskompetenz benötigt.

An der langfristigen Erosion auf der Erde und der anthropogenen Bauwerke auf ihr ist hauptsächlich Wasser Schuld. Und weil Wasser auch ein Transportmittel für Schadstoffe ist, liegt es auf der Hand, dass sich die Forschung zur Endlagersicherheit sehr wesentlich darauf beziehen muss, welche chemischen Reaktionen die Abfallstoffe, die Verpackungs- und Verdämmungstoffe und die geologischen Formationen eines Endlagersystems untereinander bei Anwesenheit von Wasser zeigen können, wie der Transport von Radionukliden und Metallen in Tiefenwässern verläuft und welche Mechanismen diesen Transport verhindern oder verlangsamen können. In der Schweiz ist generell in jeder Tiefengesteinsformation Wasser vorhanden. Lediglich die Fliessgeschwindigkeiten des Wassers variieren. Während z.B. im Kristallin die Fliessgeschwindigkeiten in den vorhandenen Spalten relativ hoch sein kann (100 m pro Jahr) ist sie ausserhalb von Spalten, oder auch in Tongestein praktisch null. Hier wird der Stofftransport nur noch durch Diffusion bewirkt. In Salzstöcken, wie in denen von Gorleben, gibt es kein Wasser. Sollte es von der Oberfläche her zum Wassereinbruch kommen, so würde sich nicht der ganze Salzstock auflösen, wie man in den Zeitungen lesen konnte, sondern es würde sich gerade so viel Salz auflösen, bis die Lösung gesättigt ist (eine Kochsalzlösung ist bei 25 °C mit 359 g NaCl pro Liter Wasser gesättigt).

Praktisch alle Elemente der radioaktiven Abfälle sind Metalle. Weil die verschiedenen Isotope eines Elementes bezüglich ihrer Chemie identisch sind, müssen geochemische Experimente nicht grundsätzlich mit radioaktiven Isotopen durchgeführt werden. Allerdings ist es oft zweckmässig, radioaktive Tracer einzusetzen (z.B. Beigabe von Sr-85 zum stabilen Sr-84). Geochemische Betrachtungen basieren auf der Kenntnis, in welcher chemischen Form die Radionuklide in wässriger Lösung auftreten. Hierzu bedarf es geeigneter Datenbasen für Komplexbildungen in wässriger Lösung und für Löslichkeitsprodukte für Festphasen. An diesen theoretischen Grundlagen wird noch immer weltweit gearbeitet. Die Verbesserung und Vervollständigung der Datenbasis ist eine dauernde Aufgabe, die erfahrungsgemäss in einem Jahrzehnt einmal oder zweimal zu einer Neubeurteilung des vorhandenen Datenmaterials im Hinblick auf Sicherheitsanalysen führen wird. Durch neue Daten können konservative Annahmen abgebaut werden. Die Sicherheitsbeurteilung wird günstiger.

Es ist leicht vorstellbar, dass im Wasser in einem Endlager zum Teil nur äusserst geringe Konzentrationen von Radionukliden (z.B. Plutonium) auftreten werden. Diese Spurenelemente bilden keine eigene Chemie aus, sondern ihr Verhalten wird wesentlich von den höher konzentrierten Hauptelementen im System mitbestimmt. Die Geochemie von Spurenmetallen kennt drei starke Rückhalte-mechanismen, nämlich die Fällung, die Adsorption und die Bildung von Mischphasen (solid solutions). Fällung bezeichnet das Abscheiden eines gelösten Stoffes durch Zugabe geeigneter fester, flüssiger oder gasförmiger Fällungsmittel als unlöslichen Niederschlag. Spurenelemente könnten bei einer Fällung der Hauptelemente mitgefällt werden. Die Adsorption der Spurenmetalle in der wässrigen Lösung ist deren Anlagerung an feste Oberflächen an der Grenze fest/flüssig. Dort kann dann das Spurenelement in einem zweiten Schritt in eine solid solution eingebaut werden, d.h. es ersetzt in einem Mineral mit einer definierten Struktur eines dessen Elemente genau und ist damit im Kristall immobilisiert (z.B. Spuren von Strontiumkarbonat in ursprünglich reinem Kalziumkarbonat). Im Einzelnen sind die genannten Rückhalteeffekte noch wenig verstanden. Dies trifft insbesondere auf solid solutions derart zu, dass sie heute in Sicherheitsanalysen konservativ unberücksichtigt bleiben müssen. Es ist für die Sicherheit der Endlagerung aber von Bedeutung, die tatsächlich vorhandenen Sicherheitsreserven nach und nach auszuloten. Deshalb gehören die Themen Fällung, Adsorption und solid solution in internationale Forschungsprojekte. In einem dieser Projekte geht es z. B. um die Thermodynamik von Actinoiden und Spaltprodukten in wässriger Lösung und an Oberflächen. Das Ziel ist eine bessere Modellierung von chemischen Prozessen, die für die Korrosion von Abfallbehältern, für die Löslichkeit des Abfalls und für den Transport von Radionukliden in die Biosphäre relevant sind. Einen Schwerpunkt bildete dabei die Untersuchung der Adsorption von Uran und Neptunium mit Hilfe von Experimenten zur Bestimmung der Radionuklidverteilung zwischen fester und flüssiger Phase bei verschiedenen Bedingungen.

Uran ist redox-sensitiv. Es kann im oxidischen Milieu gelöst sein und kann im anoxidischen als U(IV) an der festen Phase adsorbiert sein. Brennelemente enthalten viel Urandioxid. Abgebrannte Brennelemente enthalten Actinoide, Spalt- und Aktivierungsprodukte, die eine zeitlich langsam abklingende radioaktive Strahlung abgeben. Die Strahlung führt zur zeitabhängigen Radiolyse von Wasser, wodurch oxidierende Bedingungen geschaffen werden, die wiederum zeitabhängig sind. Im ungestörten tieferen Untergrund können die Bedingungen dann wieder reduzierend sein. Da die Löslichkeit von Uran oder von Actinoiden, aber auch von den Spaltprodukten Selen und Technetium, bei oxidierenden Bedingungen um 3, 4 oder noch mehr Grössenordnungen höher sein kann als bei reduzierenden Bedingungen, ist es wichtig, die Redoxsysteme im Endlager für abgebrannte Brennelemente als Funktion der Zeit und als Funktion des geometrischen Ortes zu kennen. Da, wie bereits gesagt, in der Schweiz die direkte Endlagerung von Brennelementen ernsthaft diskutiert wird, ist es notwendig, die Fragen der Elektronenübertragung in Redoxsystemen bei der Endlagerung wissenschaftlich zu untersuchen.

Die Adsorption und die anschliessende Inkorporation von Spurenelementen als Rückhalte-mechanismen sind ganz allgemein für die Sicherheit von Endlagern wichtig (s. o.). Wenn es aber nun um ein spezifisches Endlager geht, dann müssen auch die spezifischen Bedingungen für die zu betrachtenden Mechanismen berücksichtigt werden, um die Sicherheitsmargen quantifizieren zu können. Es werden deshalb entsprechende Datenbasen für die Schweizer Wirtgesteine Opalinuston im Zürcher Weinland (Lager für hochaktive verglaste Abfälle, Brennelemente und/oder langlebige mittelaktive Abfälle), Kristallin im nordargauischen Mettauer Tal (hochaktive Abfälle) und Mergel im Nidwaldischen Wellenberg (schwach- und kurzlebige mittelaktive Abfälle) erarbeitet. Entsprechende spezifische Datenbasen mussten aber auch für die Schweizer Endlagerkomponenten bereitgestellt werden. Im Vordergrund standen dabei Zement als Abfallmatrix, Verfüll- und Strukturmaterial oder tonhaltiger Bentonit als Verfüllmaterial. Ferner war der Einfluss dieser Endlagerkomponenten auf das Wirtgestein zu ermitteln. Zement sorgt bei Auslaugung für hyperalkalische Wässer (pH-Wert bis 13.5) mit entsprechendem Einfluss auf das Ge-

stein und auf das Verhalten der Hauptelemente und damit auch der Spurenelemente (s.o.). Die ungewöhnlichen Eigenschaften des Bentonits werden durch das Tonmineral Montmorillonit bestimmt. Es ist ein Dreischichtmineral (Smektit), bei dem die Elementarschicht aus zwei äusseren Tetraederschichten aus Siliziumdioxid und einer inneren Aluminium-Oktaederschicht besteht. Dadurch, dass Wasser zwischen die Elementarschichten eindringt und ihren Abstand verändern kann, ist Bentonit bzw. Montmorillonit quellfähig. Erfolgt die Quellung innerhalb eines begrenzten Volumens (z.B. in einer Dichtungsschicht), wird ein Quelldruck aufgebaut, der je nach Dichte mehrere bar erreichen kann. Der Quelldruck verhindert massgeblich weiteres Durchdringen von Wasser. Ein Montmorillonitkristall ist aus etwa 15 bis 20 Elementarschichten aufgebaut. Zwischen diesen Schichten befinden sich neben dem Kristallwasser austauschfähige Kationen, die die negativen Überschussladungen des Gitters kompensieren. Diese sind nicht besonders fest gebunden und können durch andere Kationen oder aber auch durch positiv geladene organische Moleküle ersetzt werden. Bentonit bzw. Montmorillonit hat eine besondere Fähigkeit zum Ionenaustausch und zur Oberflächenkomplexbildung. Weil Adsorptionsvorgänge Oberflächenreaktionen sind, ist das geforderte Adsorptionsvermögen wesentlich von der spezifischen Oberfläche des Tonminerals abhängig. Die spezifische Oberfläche von Montmorillonit kann bis zu $800 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ betragen. Ein anderes Tonmineral, welches untersucht wird, ist Illit. Im Gegensatz zum Montmorillonit ist Illit kaum quellfähig, besitzt aber ebenfalls ein erhebliches Sorptionsvermögen. Es ist Bestandteil von tonigen Gesteinen in der Schweiz. Die Untersuchungen zur Sorption analog zum Montmorillonit wurden deshalb auch am Illit durchgeführt.

Ein großes EU-Vorhaben war das Projekt ECOCLAY II (Effects of Cement on Clay Barrier Performance - Phase II). Dabei wurden Kenntnisse zum physikochemischen Verhalten von Ton- und Granitwirtgestein gewonnen, das durch hyperalkalische Wässer (Zement, s.o.) verändert wird. Übergeordnetes Ziel war die Bewertung, wie sich das Einschliessungsvermögen dieser Materialien verändern könnte. Zu diesem Zweck musste eine Basis von experimentellen Erkenntnissen errichtet werden, es musste ein Modell für die Veränderungen durch hyperalkalische Wässer definiert und optimiert werden. Die Bewertung der Rückhaltefähigkeit setzte zuvor als Erfolgskriterium einen internationalen Konsens über die Festlegung auf die relevantesten Mechanismen voraus. Das PSI befasste sich aktiv mit der Untersuchung der Adsorption und der Transporteigenschaften von Radionukliden und Alkali-Ionen in Bentonit und Tonwirtgestein unter alkalischen Bedingungen. Das führte auf eine Sorptionsdatenbasis für ein gestörtes Nah- und Fernfeld, zeigte die Signifikanz der Verzögerung der Freisetzung durch Fällung von Radionukliden im Vergleich mit der Adsorption an Oberflächen von Feststoffen auf und erlaubte schliesslich eine Einschätzung der Effekte von hyperalkalischen Wässern auf das Migrationsverhalten von Radionukliden, die in Tonformationen oder künstliche Bentonitbarrieren aus Zementendlagern freigesetzt wurden. Ein weiteres EU-Projekt, an dem das PSI zusammen mit 20 internationalen Partnern beteiligt war, ist FEBEX II (Full Scale Engineered Barrier Experiment in Crystalline Host Rock - Phase II). In diesem Programm wurden einerseits die Machbarkeit der Einlagerung von Behältern in den kristallinen Fels demonstriert, andererseits Methoden und Modelle über das Verhalten in der nahen Umgebung entwickelt. FEBEX II war die Fortsetzung eines gross angelegten Feldversuches der NAGRA im Felslabor Grimsel zur in-situ Untersuchung der Bentonitverfüllung von Lagerkavernen. Schwerpunkt im PSI war dabei die Modellierung des Bentonitporenwassers und der Adsorption von Cäsium, Strontium, Selen und Uran auf Montmorillonit.

Im Mont Terri Untertage-Felslabor (Kanton Jura) wurde beispielhaft die geologische Formation Opalinuston als potentielles Wirtgestein für radioaktive Abfälle untersucht. Im Rahmen dieses internationalen Forschungsprojektes wurden Messungen durchgeführt um den Opalinuston allgemein zu charakterisieren. Ziel im Speziellen war die Erkundung der Auflockerungszonen um aufgefahrene Stollen. Die Ergebnisse sind von Bedeutung für die Standsicherheit und Dichtigkeit eines Endlagers für radioaktive Abfälle. Im Rahmen des Mont Terri Projektes beschäftigt sich

das PSI mit der Analyse und der Vorhersage von in-situ Porenwässern. Eine der Voraussetzungen zur Beschreibung von Sorptionsreaktionen stellt die Kenntnis der Porenwasserchemie der Gesteine und des Zements dar. Die Wasserchemie ist weiter auch für die Evaluation der heutigen hydrologischen Bedingungen und der Paläohydrologie von Wichtigkeit und wird bei zukünftigen Standortuntersuchungen am Wellenberg und im Zürcher Weinland grösseres Gewicht bekommen.

Opalinuston ist ein Tongestein, das vor 180 Millionen Jahren in einem Flachmeer der Jurazeit entstanden ist. Im Opalinuston sind fossile Schalen des Ammoniten «*Leioceras opalinum*» weit verbreitet. Der Name ist auf den schillernden (opalisierenden) Glanz der Schalen zurückzuführen. Der Opalinuston weist mehrere Eigenschaften auf, die sich auf die Sicherheit eines geologischen Tiefenlagers günstig auswirken. Dazu gehören neben dem guten Einschlussvermögen, der sehr geringen Wasserdurchlässigkeit und dem vorwiegend diffusiven Transport gelöster Stoffe auch eine homogene Struktur, die Rückhaltung von Radionukliden an den Tonmineraloberflächen sowie die Fähigkeit, Risse und Klüfte durch Quellung selbst zu Verschließen. Anhand von Messungen der Isotopenzusammensetzung von Porenwasser kann man unterscheiden, welcher Anteil des Wassers aus „frischem“ Oberflächenwasser stammt und welcher Anteil noch aus dem 180 Millionen Jahre alten Meer stammt. Daraus ermittelt man eine verschwindend kleine Diffusionsgeschwindigkeit von Wasser im Opalinuston.

Die Beschreibung des Stofftransportes im Tiefengestein ist seit Anbeginn ein weiterer Schwerpunkt der Arbeiten zur Sicherheit von Endlagern und muss es logischerweise auch bleiben, da die Endlagersicherheit überwiegend von den Transportmöglichkeiten der Schadstoffe abhängt und weil der Stofftransport durch alle komplexen geochemischen Prozesse beeinflusst wird. Die Validierung der Transportmodelle ist eine besonders wichtige Aufgabe, weil Aussagen über Zeiträume gemacht werden müssen, die sich Experimenten entziehen. Das PSI hatte schon in der Vergangenheit massgeblich zu einem besseren Verständnis der Transportmechanismen und des Einflusses der geometrischen Strukturen, in welchen der Transport stattfindet, beigetragen. Es war aktives Mitglied in verschiedenen internationalen Projekten und war es auch im Rahmen der schwedischen Äspö-Task-Force. Diese ist ein Forum für die Organisationen, die das Äspö Hard Rock Laboratory Project (Simulation von Einlagerungstechniken) unterstützen, und auf dem Gebiet der numerischen Modellierung von Grundwasserströmungen und dem Transport von gelösten Stoffen in Hartgestein mit Spalten tätig sind. Die Task Force schlug Arbeiten im Projekt vor, beurteilte sie, wertete sie aus und trug auch selbst dazu bei.

Zur Modellvalidierung durch Feldexperimente gehörte z.B. auch das Migrationsexperiment im Felslabor Grimsel. Die Feldexperimente integrieren die oben beschriebenen Untersuchungen. So ist z.B. die Sorption beim Transport sorbierender Tracer zu berücksichtigen. Löslichkeitsbegrenzungen bestimmen den Quellterm für Transportrechnungen. Die Arbeiten wurden in zwei Richtungen fortgeführt. Zum ersten musste die gekoppelte Beschreibung von den zuvor genannten chemischen Reaktionen und dem Transport verbessert werden. Es wurde bereits erwähnt, dass über das Verhalten von direkt endgelagerten Brennelementen (Redox-Systeme) nicht genug bekannt ist. Sollte laut Kernenergiegesetz die Wiederaufarbeitung von Brennelementen in La Hague oder in Sellafield verboten werden, bliebe für ein hochaktives Endlager mit Standort Schweiz nur die direkte Endlagerung von Brennelementen übrig. Es war deshalb wichtig, sich diesem Problem wissenschaftlich anzunähern. Wichtig werden auch Arbeiten zur Hydrologie und zum Stofftransport bleiben. Regionale Hydrologiemodelle sind unter Berücksichtigung der Wasserchemie und des Stofftransportes mit dem Wasser zu validieren. Noch nicht untersucht wurde der Einfluss von mikrobieller Aktivität auf die chemischen Vorgänge in einem Endlager-System. Will man die Sicherheitsbetrachtungen für ein Endlager noch mit einer Konsequenzenanalyse ergänzen, dann wird es notwendig werden, die Biosphäre detaillierter zu modellieren. Dabei wären dann auch Klimaszenarien der fernen Zukunft zu antizipieren, bzw. zu postulieren. In diesem Zusammenhang sei erwähnt, dass selbstverständlich bei der Beurteilung des

Verhaltens eines Endlagers im Zeitraum von einer Million Jahre auch der Gletscherdruck auf das Tiefenlager während der kommenden Eiszeiten (ca. alle 10.000 Jahre) berücksichtigt wird.

Wie an Beispielen gezeigt wurde, besteht für die Lagerung radioaktiver Abfälle der Wille, dies mit bestmöglichem Vorauswissen über die möglichen Folgen zu tun. Bei nichtaktiven Abfällen wurde das in der Vergangenheit nicht immer so gehandhabt. Es läge deshalb nahe, die Erkenntnisse und die erarbeiteten Methoden und Modelle, sowie die gesammelten Daten auf die Lagerung von toxischen chemischen Abfällen zu adaptieren, was aber gesellschaftspolitisch nicht als machbar erscheint. Die nichtnukleare Industrie ist vermutlich nicht bereit, die hohen Standards der Entsorgung radioaktiver Abfälle zu übernehmen.

Für den Sicherheitsnachweis wird übrigens unterstellt, dass die Stahlfässer im Jahr 10.000 nach Einlagerung korrodiert sind. Die Radionuklide in den Glasblöcken können nun durch das als vorhanden unterstellte Wasser aus dem Glasblock, aus dem Fass und dem Beton und aus dem umgebenden Betonit gelöst und an die Biosphäre transportiert werden. Dabei werden die durch die oben beschriebenen Arbeiten erworbenen Kenntnisse der chemischen Thermodynamik eingesetzt. Es wird die Retardierung der Radionuklide betrachtet, wenn diese im Wasser durch technische und natürliche Barrieren aus dem Tiefenlager transportiert werden, und wenn sie mit zugänglichen Festkörperoberflächen wechselwirken. Die Sorption ist ein Pfeiler der Langzeitsicherheit für geologische Tiefenlager, ebenso wie der Einfluss von natürlichen Kolloiden. Mit all den vorhandenen Kenntnissen lässt sich heute in der Schweiz der Sicherheitsnachweis für ein Endlager für langlebigen hochaktiven Abfall erbringen.

Ein kompletter Entsorgungsnachweis besteht aus drei Teilen:

Der oben betrachtete Sicherheitsnachweis muss zeigen, dass im gewählten Wirtgestein, mit den aufgrund von Sondierbefunden nachgewiesenen geologischen und hydrogeologischen Eigenschaften und mit den technischen Barrieren, die Langzeitsicherheit des Tiefenlagers gewährleistet ist.

Der Standortnachweis muss aufgrund dokumentierter Untersuchungsergebnisse zeigen, dass ein genügend grosser Wirtgesteinskörper mit den im Sicherheitsnachweis festgehaltenen Eigenschaften existiert, so dass die Realisierung eines Tiefenlagers im besagten Standortgebiet mit guter Aussicht auf Erfolg in Angriff genommen werden könnte.

Der Machbarkeitsnachweis muss zeigen, dass im gewählten Wirtgestein ein Tiefenlager unter Einhaltung der Sicherheitsvorschriften, mit den heute vorhandenen technischen Mitteln gebaut, betrieben und langfristig sicher verschlossen werden kann.

Im Jahr 2003 hat die NAGRA einen Entsorgungsnachweis mit dem Projekt Opalinuston vorgelegt. Mit dem Bericht HSK 35/99 hat die HSK (Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen) am 3. August 2005 ihr „Gutachten zum Entsorgungsnachweis der NAGRA für abgebrannte Brennelemente, verglaste hochaktive sowie langlebige mittelaktive Abfälle (Projekt Opalinuston)“ vorgelegt. Aufgrund der Ergebnisse ihrer Überprüfung kam die HSK (seit Ende 2008 ENSI: Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat) zum Gesamturteil, dass der gesetzlich geforderte Entsorgungsnachweis für abgebrannte Brennelemente, verglaste hochaktive sowie langlebige mittelaktive Abfälle erbracht worden ist. Die HSK empfiehlt dem Bundesrat deshalb, dem Antrag der NAGRA, von der Erfüllung der Auflagen zum Projekt Gewähr im zustimmenden Sinne Kenntnis zu nehmen und den Entsorgungsnachweis als erbracht zu genehmigen, zuzustimmen.

Um das Jahr 2000 gebar die Nachhaltigkeitsdiskussion im Zusammenhang mit der Kernenergienutzung am laufenden Band abstruse Ideen. Den sehr fortgeschrittenen Stand von Wissenschaft und Technik zur Entsorgung hochaktiver langlebiger Reaktorabfälle hat man öffentlich bis heute nicht zur Kenntnis genommen. Entsorgung war der nachhaltig ungeklärte Pferdefuß der Kernenergie. Tatsächlich kann sich jeder sehr umfangreich aus dem Internet informieren lassen. Man wird dann sofort merken, dass Politik und Wissenschaft das Heu nicht auf derselben Bühne ha-

ben. Die notwendig lange Zeitdauer des Einschlusses schreckt die Mütter der kommenden 30.000 bis 40.000 Generationen. Welch eine lange Zeit der Unsicherheit und Bedrohung durch den Strahlentod! Jeder, auch wenn er nicht an ewiges Leben glaubt, ist aufgerufen, erschreckliche Endlager-Szenarien zu erfinden. Was würde geschehen, wenn nun während der nächsten Millionen Jahre ein Prospector bei der Ölsuche auf ein inzwischen längst vergessenes Endlager stieße? Da kommt nachhaltige Hilfe aus „wissenschaftlichen Kreisen“. Das Endlager gerät wahrscheinlich nicht in Vergessenheit, weil man es nicht eine Millionen Jahre lang, sondern nur noch einige Hunderttausend Jahre lang bewachen muss. Man muss den langlebigen Abfall nur so behandeln, dass man im Tiefenlager schon z. B. nach entsprechend kürzerer Zeit das Aktivitätsniveau einer Uranerzlagerstätte erreicht. Also schon nach 20.000 Menschengenerationen von heute an. Allerdings liegt nicht auf der Hand, dass sich der oben beschriebene Entsorgungsnachweis verändern würde, und dass man das Endlager dann leichter oder billiger bauen könnte. Nur viel später, was ja auch vermutlich die wahre Absicht ist. Die Technik der Verwandlung sehr langlebigen Abfalls in weniger langlebigen Abfall müsste ja erst ausreifen. Und so lange könnte man nun auch wieder Forschungsmittel beantragen, die schon allein deshalb genehmigt werden würden, weil sie einer nachhaltigen Zielsetzung dienen sollen. Die Politiker könnten die Auseinandersetzung mit ihrem Stimmvolk darüber, in wessen Nähe das Endlager errichtet werden soll, nochmals postponieren.

Europaweit war damals eine „Technical Working Group“ unter der Führung von Nobelpreisträger Carlo Rubbia damit beschäftigt, einen Vorgehensplan für eine entsprechende Demonstrationsanlage zu erarbeiten. Eine Vorreiterrolle spielte damals das französische CEA (Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives), das zu den entsprechenden Arbeiten in Frankreich sogar gesetzlich verpflichtet war. Obwohl die Forschung zur Kernenergie in Deutschland vom damaligen Minister J. Trittin abgewürgt werden sollte, war das Kernforschungszentrum Karlsruhe ebenso wie das Paul Scherrer Institut in der Schweiz mit von der Partie. Die Grundidee war folgende: Selbst bei Wiederverwendung des im Reaktor erzeugten ^{239}Pu in Pu/U-Mischoxidbrennstoff bleiben die schwereren Transurane, die im Kernreaktor durch Neutroneneinfang aus dem zu ca. 97 % im Brennstoff eines LWR enthaltenen ^{238}U entstehen, das Hauptproblem des nuklearen Abfalls wegen ihrer langzeitigen Radiotoxizität. Diese „minor actinides“ sind durch Neutronen spaltbar und könnten daher im Prinzip selbst als Kernbrennstoff eingesetzt werden. Damit fände unter Energiefreisetzung eine Umwandlung in überwiegend kurzlebige Kerne statt. Allerdings gibt es da eine Reihe von Schwierigkeiten:

Die benötigten Neutronen müssen eine höhere Energie als die thermischen Neutronen besitzen, die für die Spaltung von ^{235}U notwendig sind. Eine Wasserkühlung solcher Reaktoren wäre deshalb nicht möglich, weil Wasser die Neutronen zu stark moderieren würde. Die Reaktoren dürften natürlich auch kein ^{238}U enthalten, weil sonst ständig neue Actinoide gebildet werden würden. Damit geht der für die Stabilität der Kettenreaktion wichtige Doppler-Effekt verloren, der für einen negativen Temperaturkoeffizienten der Reaktivität sorgt. Bei der Spaltung der Transurane entstehen nicht mehr hinreichend viele Emitter verzögerter Neutronen, die für die Kontrolle des Reaktors ebenfalls sehr wichtig sind. An das Kontrollsystem eines Actinoidenbrenners wären folglich erheblich höhere Anforderungen zu stellen als an einen konventionellen Reaktor. Aus diesem Grund entstand die Idee, solche Anlagen durch einen entsprechenden Aufbau des Kerns unterkritisch auszulegen und die zur Aufrechterhaltung der Kettenreaktion nötigen Neutronen von außen zuzuführen. Man nennt solche Systeme „accelerator driven systems“, wenn Spallationsneutronen mit Hilfe beschleunigter Protonen erzeugt werden.

Eine solche Anlage schaltet sich von selbst ab, wenn die Neutronenzufuhr durch Abschalten der Stromversorgung des Protonenbeschleunigers unterbrochen wird. Für die Erzeugung der Zusatzneutronen kommt der Spallationsprozess in Frage, wie er auch in der Forschungs-Neutronenquelle SINQ des PSI genutzt wird. Hier werden aus schweren Materialien (z. B. Pb)

durch Beschuss mit energiereichen Protonen, eine große Zahl von Neutronen freigesetzt („verdampft“). Die von den Protonen getroffene Anordnung aus schwerem Material wird „Target“ genannt. Ins Auge gefasst wurde ein Target aus flüssigem Schwermetall, nämlich eine eutektische Legierung aus Blei und Wismut.

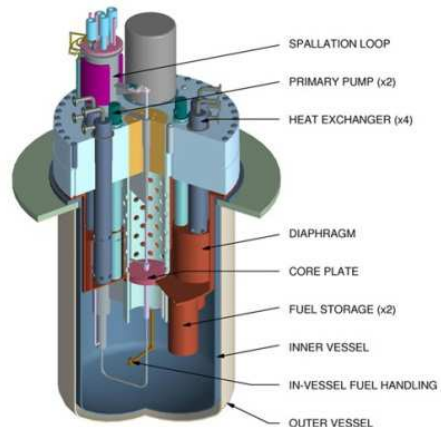
Die seit 1996 am PSI in Betrieb befindliche Neutronenquelle SINQ ist die erste und gleichzeitig die stärkste ihrer Art. Sie liefert keinen gepulsten Neutronenfluss, wie die meisten anderen Quellen, sondern einen kontinuierlichen von 10^{14} n/cm²/s. Neben thermischen Neutronen liefert ein Moderator aus flüssigem Deuterium auch langsame Neutronen, welche ein tieferes Energiespektrum besitzen („kalte Neutronenquelle“). Der PSI-Beschleuniger und die bestehende SINQ-Anlage eigneten sich dank der bereits vorhandenen technischen Voraussetzungen dazu, ein solches Targetsystem zu erproben. Schon damals stand ein Protonenstrahl von geeigneter Stärke zur Verfügung, wobei das PSI mit 2 mA bei 590 MeV den Weltrekord bezüglich des beschleunigten Protonenstroms hielt. Außerdem waren genügend Abschirmung und ein ausreichend dimensioniertes Wärmeabfuhrsystem vorhanden. Die Anlage wurde 2001 mit einem Target aus festem Blei nahe an der Grenze der maximal möglichen Wärmebelastung betrieben. Im Jahre 1998 hatten Institutionen aus 10 Ländern, die alle aktiv an ADS-relevanten Projekten arbeiteten und teilweise auch entsprechende Forschungseinrichtungen betrieben, ein gemeinsames Vorhaben unter dem Namen „MEGAPIE“ (**MEGA**watt **P**ilot **E**xperiment) in Angriff genommen. Durch die Inbetriebnahme des MEGAPIE-Targets im Sommer 2006, bei dem das Feststofftarget durch eines aus einer Blei- und Wismut-Legierung ersetzt war, konnte die Neutronenausbeute um ca. weitere 80 % gesteigert werden. Beim PSI wurden MEGAPIE und ADS bei heftigen internen Auseinandersetzungen voneinander getrennt. Der Forschungsbereich „Nukleare Energie und Sicherheit“ beschloss im Jahr 2002, den Fragen der Actinoidenverbrennung mit ADS nicht mehr nachzugehen. Unser damaliges F+E-Programm 2003 wies keine Mittel mehr für diese Art der Forschung aus. An der Weiterentwicklung eines Targets für die SINQ bestand natürlich Interesse, zumal für diese Arbeiten Drittmittel eingesetzt werden konnten. Im heutigen Forschungsbereich „Forschung mit Neutronen und Myonen“ betrieb man das Projekt MEGAPIE mit Partnern weiter, bis die Machbarkeit eines beschleunigergetriebenen Flüssigmetall-Targets bei 1 MW Leistung demonstriert werden konnte. Zweifellos muss man bewundern, welche Fülle von materialtechnischen, thermohydraulischen, fluiddynamischen und nuklearen Problemen dabei zu bewältigen waren. Dennoch war ich von Anfang an gegen das Projekt eingenommen und musste mich heftig gegen die Übertragung des Projekt-Controllings und die Federführung für den Sicherheitsbericht wehren.

MEGAPIE wurde 2007 beendet. Nach einem Langzeitbetrieb wurde die Quelle abgeschaltet, das Flüssigmetall gefror und das nunmehr feste Target wurde in die Hotzelle des ZWILAG gebracht und dort schichtweise auseinandergenommen und untersucht. Am 23.2.2007 schrieb der innovations-report: *„...Die Aussicht, radioaktive Abfälle einfach "verbrennen" zu können, hat zu einem großen internationalen Interesse an MEGAPIE geführt. Seit dem Jahr 2000 hat eine internationale Arbeitsgruppe den Aufbau des Experiments vorangetrieben und verschiedenartige Versuche durchgeführt. Die 170 Mitglieder starke Gruppe besteht aus Wissenschaftlern, Ingenieuren und Technikern aus neun Forschungseinrichtungen in Europa, der Europäischen Kommission, Japan, USA und Korea. Wesentliches Ergebnis des 4-monatigen Langzeitexperiments MEGAPIE (Megawatt Pilot Experiment) war die Bestätigung der um etwa 80 % erhöhten Neutronenflussdichte gegenüber einem Festkörpertarget sowie der fehlerfreie Betrieb eines leistungsstarken Flüssigmetall-Targets. Damit wurde gezeigt, dass ein solches Target in einer Transmutationsanlage eingesetzt werden kann. Das Forschungszentrum Karlsruhe war an dem Experiment federführend für Deutschland beteiligt. Auf Grundlage der experimentellen Erfahrungen im Bereich Reaktortechnik, Sicherheit sowie Flüssigmetalltechnologie am Forschungszentrum Karlsruhe leisteten die Wissenschaftler und Ingenieure wesentliche Beiträge zur Qualifizierung und zum Betrieb des MEGAPIE-Targets....“* Aus dem Text geht nochmals deutlich hervor, wie internati-

onal völlig überflüssige Forschungsvorhaben finanziert werden konnten, indem man politisch die Nachhaltigkeitskarte ausspielte, die eine Verkürzung des Endlagereinschlusses von radioaktivem Abfall versprach.

In der EU hatten sich unabhängig von MEGAPIE 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. 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). Die „Sustainable Nuclear Energy Technology Platform“ (SNETP) der EU klassifizierte MYRRHA/XT-ADS als einen Eckpfeiler der zukünftigen europäischen Forschungsvorhaben. Das gesicherte Gesamtbudget sollte etwa **1 Milliarde €** betragen. In der Planung sollen Ausschreibungen und Lieferverträge in 2015 beginnen. Für die Komponentenherstellung und die Baumaßnahmen, die in 2016 beginnen sollten, waren 3 Jahre geplant. Der Bau der Gesamtanlage kann in 2019, erfolgen, danach schließt sich eine dreijährige Testphase mit einem weiteren Jahr zur graduellen Leistungssteigerung an. Ab 2024 soll der Experimentierbetrieb mit den nominellen Kennwerten stattfinden.

Heute (2012) ist von dem „Durchbruch“ nichts mehr zu verspüren, und es brüstet sich auch niemand mehr mit den MEGAPIE-Ergebnissen. Zwar wird in Belgien zurzeit immer noch ein Forschungsreaktor auf Basis des Rubbia-Vorschlags, der bereits genannte MYRRHA-Reaktor, konzipiert. In den Perspectives of Nuclear Physics in Europe - Nuclear Physics European Collaboration Committee (NuPECC) - Long Range Plan 2010 heißt es, dass die Belgische Regierung 40 % der Finanzierung von MYRRHA übernehmen wolle. Der Rest müsse von einem internationalen Konsortium aufgebracht werden, das in den kommenden Jahren zusammengestellt werden müsse. Das müsste dann allerdings sehr schnell geschehen, wenn im Jahr 2015 mit dem Bau begonnen werden soll. Ich war schon im Jahr 1998 an entsprechenden Zusammenarbeitsverhandlungen beteiligt. Wie beim Rubbia-Reaktor wird ein unterkritischer, durch Blei passiv gekühlter Reaktorkern durch einen Protonenstrahl angetrieben. Abweichend vom ursprünglichen Konzept wird der Reaktor allerdings als Kernbrennstoff nicht Thorium, sondern Mischoxid-Brennstäbe enthalten, was ihn als echten Actinoidentransmuter unbrauchbar macht. Zweck dieser Anlage wird es sein, neben anderen Forschungsgebieten die Technologie der Transmutation im Protonenstrahl-getriebenen Reaktor im Piloteinsatz zu testen. Das ist natürlich l'art pour l'art. Das SCK in Mol, Belgien, gehört zu den EURATOM-Zentren. Es suchte schon seit vielen Jahren nach einer gemeinschaftlich finanzierten Forschungseinrichtung. Unter anderem beteiligt man sich auch an GIF IV.



Die IAEA in Wien hatte sich ebenfalls schon sehr früh für ADS eingesetzt. Ich habe das nie befürwortet, obwohl ich häufig an Expertensitzungen in Wien auch zu diesem Thema teilgenommen hatte. Wie viele Fachleute, empfand auch ich die IAEA überwiegend als eine Institution, die aktuelles Wissen aus Forschungsprogrammen der westlichen Welt, die mit Steuermitteln finanziert worden waren, an den „Ostblock“ und Staaten wie Indien und Pakistan weitergegeben hat. Der Leiter der Internationalen Atomenergieorganisation (IAEO), Mohammed el-Baradei, ein ägyptischer Diplomat, war von 1997 bis Ende 2009 Generaldirektor der IAEO und erhielt zusammen mit dieser im Jahr 2005 den Friedensnobelpreis. Ende April 2012 gründete er in Ägypten eine eigene politische Partei namens „Verfassungspartei“. Er führt außerdem das Oppositionsbündnis „Nationale Heilsfront“ an.

Im Rahmen des „International Topical Meeting on Nuclear Research Applications and Utilization of Accelerators“, führte die IAEA vom 4. bis 8. May 2009 ein Satellite Meeting "European

Fast Neutron Transmutation Reactor Projects (MYRRHA / XT-ADS)" durch. Erleichtert nahm man zur Kenntnis, dass das Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) endlich auch für die Nachhaltigkeit radioaktiver Abfälle herangezogen werden kann. „Klimaveränderung“ fängt an, der „Nachhaltigkeit“ den Rang abzulaufen. Man muss beides miteinander verquicken. Eine wichtige Frage könnte lauten: „Verändert die Freisetzung von Radioaktivität das Klima nicht doch nachhaltiger als die CO_2 -Freisetzung?“ Die heute drei Jahre alte Ankündigung der IAEA lautete:

*“According to the projections published by the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), the median electricity increase till 2050 will be by a factor of almost 5. It is reasonable to assume that nuclear energy will play a role in meeting this demand growth. However, there are four major challenges facing the long-term development of nuclear energy as a part of the world’s energy mix: **improvement of the economic competitiveness, meeting increasingly stringent safety requirements, adhering to the criteria of sustainable development, and public acceptability. Issues linked to meeting the sustainability criteria define the scope of this Satellite Meeting.** While not involving the large quantities of gaseous products and toxic solid wastes associated with fossil fuels, radioactive waste disposal is today’s dominant public acceptance issue. In fact, small waste quantities permit a rigorous confinement strategy, and mined geological disposal is the strategy followed by some countries. Nevertheless, public opposition arguing that this does not yet constitute a safe disposal technology has largely stalled these efforts. One of the primary reasons that are cited is the long life of many of the radioisotopes generated from fission. **This concern has led to increased research and technology development efforts to establish a technology aimed at reducing the amount of long lived radioactive waste through transmutation in fission reactors or hybrid systems like the Accelerator Driven System (ADS).**”*

Etwa zum gleichen Zeitpunkt erschien eine ernüchternde Studie der Nuclear Energy Agency (NEA) der OECD (OECD-NEA-Report 6194, 2009), in der das Szenario für Deutschland und andere Länder mit modernen Transmutern komplett durchgerechnet worden war. Dabei (heute natürlich obsolet) wurde für Deutschland der Brennstoffkreislauf bis zum damals (2009) geplanten Ausstieg durchsimuliert, um die genaue Zusammensetzung der Abfallmengen zu bestimmen. In einem zweiten Schritt wurde der Abbau durch **8 Transmuter** (jeweils $840-MW_{th}$), die ab 2030 fiktiv mit **40 Jahren Laufzeit** arbeiteten und **3 weiteren Transmutern**, die ab 2070 den Output der vorherigen Transmuter verarbeiteten, durchsimuliert. Es ergab sich folgendes Bild.

- Durch die Transmutation langlebiger in kurzlebige Nuklide stellt sich **kurzfristig kaum eine Verringerung der Radioaktivität** bzw. der Zerfallswärme ein - sie kann sich sogar leicht erhöhen.
- Der eigentliche Erfolg der Transmutation stellt sich erst nach **einigen hundert Jahren** ein. Verglichen mit der Situation ohne die 80-jährige ADS-Transmutation ist die Zerfallswärme nach 100 Jahren nur halb so hoch und nach 2.000 Jahren nur ein Viertel so hoch.
- Das Plutonium würde sich auf ca. 20 % der ursprünglichen Menge reduzieren und wäre überdies von der Isotopenzusammensetzung so verändert, dass eine waffentaugliche Verwendung nicht mehr möglich wäre.

Wegen der noch zu lösenden technischen Probleme bleibe aber abzuwarten, heißt es im Bericht von 2009 weiter, ob eine Überführung der Transmutation in eine praktische Nutzung (Realisierbarkeit) tatsächlich möglich wäre. Wenn sich die Kosten / Nutzenentwicklung ähnlich darstellen sollte wie bei konventionellen Kernkraftwerken, könne man davon ausgehen, dass der Bau von ADS aus wirtschaftlichen Gründen derzeit (2012) ebenso unwirtschaftlich sein werde wie der Bau neuer konventioneller Kernkraftwerke (Anm.: 11 ADS allein für die BRD beim nuklearen Ausbaustand von 2009!). Das alles war schon 1998 vorauszusehen. Dennoch sind inzwischen Unsummen für die Untersuchung der Möglichkeit zur nachhaltigen Actinoidentransmutation ausgegeben worden. Es lässt sich trefflich zeigen, wie große internationale Projekte ohne Sinnprüfung von einzelnen Institutionen durchgeführt werden, die jeweils um das Überleben irgendeiner ihrer Forschungsmaschinen kämpfen, welche ihrerseits wissenschaftlich längst amortisiert sind. Dazu braucht es dann noch einen schlaunen Kopf, dem gern geglaubt wird, z. B. einem



Nobelpreisträger, der sich als Ideengeber feiern lässt, auch wenn sich seine Idee, wie viele seiner anderen Ideen auch, als unbrauchbar erwiesen hat. Rubbia hatte übrigens 2007 verkündet: Von der Mineralölsteuer müsse auch in Deutschland endlich ein erheblicher Teil in die Forschung geleitet werden, denn die derzeitigen Ausgaben seien „Hühnerscheiße“ im Vergleich zu den vielen Milliarden Euro, die nötig seien, um Vergleichbares zu leisten wie vor vierzig Jahren die Mondlandung. Als Direktor

des CERN wusste er, wovon er sprach, nämlich von reiner Geldvernichtung. Als CERN-Direktor erhielt Carlo Rubbia gemeinsam mit Simon van der Meer 1984 den Nobelpreis für Physik „Für ihre entscheidenden Einsätze bei dem großen Projekt, das zur Entdeckung der Feldpartikel W und Z, Vermittler schwacher Wechselwirkung, geführt hat“. Die eigentliche Ursache für den Transmutationswahn ist, und das muss abschließend festgestellt werden, die völlige Kenntnislosigkeit der politischen Gesellschaft. Daran können weder die Klimaerwärmung noch das Higgs-Boson in absehbarer Zeit etwas ändern. Sustainable Goofiness!

Freiburg, den 12. Februar 2012

