

acdreas

accelerator driven reactors

gefördert durch



**Stadt
Wien**

Umweltschutz

Autoren

DI (FH) René Bolz, wissenschaftlicher Mitarbeiter
DI Rupert Christian, wissenschaftlicher Mitarbeiter

Projektleiter

DI Rupert Christian, Geschäftsführer des Forum Wissenschaft & Umwelt

Impressum

Forum Wissenschaft & Umwelt
Palmgasse 3/2
1150 Wien

Tel.: 01/216 41 20
Fax: 01/216 41 20-20
E-Mail: office@fwu.at

erstellt im Jahr 2025

Vorwort

Die Stadt Wien verfolgt ehrgeizige Programme mit dem Ziel der Treibhausgas-Neutralität 2040. Sie setzt sich seit Jahrzehnten gegen die Verwendung der Atomenergie ein. Das Forum Wissenschaft & Umwelt will den langjährigen erfolgreichen Einsatz der Stadt Wien gegen den Einsatz von Atomenergie unterstützen. In letzter Zeit sind weltweit unter dem Deckmantel des Klimaschutzes verstärkt Initiativen zum Ausbau der Atomkraft zu beobachten.

Im Zuge der COP28 gründeten 25 Staaten die Atom-Allianz „net nuclear zero“, die sich dafür einsetzt, die im Jahr 2020 weltweit in Atomkraftwerken (AKW) installierte Leistung bis 2050 zu verdreifachen. Befürworter behaupten unzutreffend, dass die Klimaneutralität bis 2050 ohne Atomkraft nicht erreichbar ist. Auch im Beschlusstext der COP28 findet sich die Verwendung von Atomenergie zur Erreichung der Klimaziele. Sehr ähnliche Ziele setzten sich die 32 Staaten, die am „Nuclear Energy Summit“ der IAEA die „Declaration on nuclear energy“ unterzeichneten. Kooperationen sind natürlich auch mit der Initiative „Atoms4NetZero“ der International Atomic Energy Agency geplant. In Europa wurde die Europäische Nuklearallianz ins Leben gerufen. Die EU-Kommission, die beschlossen hat die THG-Emissionen bis 2040 um 90% zu reduzieren, zählt die Atomenergie zu den für die Zielerreichung geeigneten Technologien. Sie rief eine Industrieallianz für kleine modulare Reaktoren (SMR) ins Leben.

Immer wieder werden angeblich „neue“ (Patent-) Lösungen angekündigt. In dieser Arbeit werden accelerator-driven subcritical reactors (ADR) betrachtet, deren erste Konzepte auf die 1950er Jahre zurückgehen. Aktuell gibt es etliche Forschungsprojekte, aber nicht einmal einen Demo-Reaktor und es steht auch keiner in Aussicht. ADR ändern also nichts daran: Kernenergie könnte, wenn überhaupt, nur minimal zur Reduktion von Treibhausgas-Emissionen beitragen, und das viel zu spät.

Wer Kernenergie unterstützt, tritt dafür ein, (Steuer-) Gelder im großen Umfang in eine äußerst kostspielige, nur begrenzt verfügbare, nicht emissionsfreie, nicht nachhaltige, aber über Jahrtausende gefährliche und belastende Energieform zu investieren – und dieses Geld damit wirklich zukunftsfähigen Energien, Speichersystemen, der Hebung von Effizienzpotenzialen und dem sozialen Ausgleich vorzuenthalten.



Prof. Dr. Reinhold Christian
Geschäftsführender Präsident



Univ.-Doz. Dr. Peter Weish
Präsident

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	4
1 Einleitung	6
2 Grundidee	7
3 Historische Entwicklung	9
4 Bestandteile	10
4.1 Spallationsneutronenquelle	11
4.1.1 Beschleuniger	11
4.1.2 Spallationstarget	13
4.1.3 Strahlfenster	13
4.2 Reaktor	14
4.2.1 Kühlmittel	14
4.2.2 Reaktorkern	14
4.3 Brennstoff	15
5 Forschungsprojekte im Zusammenhang mit ADR	16
5.1 EFIT	17
5.2 CLEAR	17
5.3 CiADS	17
5.4 MYRRHA	17
5.5 Zusammenschau	18
6 Transmutation und Incineration	20
7 Fazit	21
Abbildungsverzeichnis	22
Tabellenverzeichnis	22
Glossar	22
Quellenverzeichnis	24

1 Einleitung

Der globale Energiehunger ist enorm – und weiterhin im Steigen begriffen. Der Klimawandel sorgt allerdings dafür, dass unsere Energiesysteme von den fossilen Energieträgern weg auf möglichst treibhausgasfreie Energiequellen umgestellt werden müssen. Zwar sind mittlerweile die erneuerbaren Energieträger ausbautechnisch auf dem Vormarsch und liefern bereits nennenswerte Beiträge zur Energieversorgung. Aber auch die Atomlobby ist – mit dem Werbespruch der „CO₂-freien“ Energie – umtriebiger wie schon lange nicht mehr.

Neben den Reaktoren der Generation IV und zahllosen „Small Modular Reactor-“ (SMR-) Konzepten gab und gibt es auch immer wieder Stimmen (wie beispielsweise den Nobelpreisträger Carlo Rubbia), die sich für die sogenannten beschleunigergetriebenen Reaktoren (accelerator driven reactors, ADR) einsetzen.

Dieses Konzept verspricht zusätzliche Sicherheit dadurch zu erreichen, dass auf eine externe Neutronenquelle zurückgegriffen wird und somit der Reaktorkern „unterkritisch“ ausgeführt werden kann. Darunter ist zu verstehen, dass die Spaltreaktionen im Kern nicht ausreichend Neutronen liefern um die Kettenreaktion selbstständig aufrecht erhalten zu können. Wird also die Neutronenquellen abgeschaltet, gibt es auch keine Spaltreaktionen mehr.

Grundzüge des Konzepts blicken aber bereits auf das stattliche Alter von 75 Jahren zurück – und dennoch wurde bisher kein ADR realisiert. Im Rahmen des Projekts „accelerator driven reactors“ (acdreas) untersucht das Forum Wissenschaft & Umwelt warum das – trotz all der versprochenen Vorteile – so ist. Zu diesem Zweck werden grundlegende Konzepte, wesentliche Bestandteile sowie „historische“ und aktuelle Forschungsprojekte zu ADR analysiert.

2 Grundidee

Herkömmliche Kernkraftwerke (KKW) haben vor Allem drei grundlegende Probleme, nämlich die Sicherheit, den Brennstoff und den Abfall. Mit dem Sicherheitsproblem ist hier gemeint, dass es für die Energiegewinnung nötig ist, dass die Kettenreaktion aufrecht bleibt. Die Neutronen müssen also Spaltreaktionen auslösen, in deren Zug wiederum neue Neutronen frei werden, die zu Spaltreaktionen führen usw.

Ein Reaktorkern (bzw. dessen Design) heißt kritisch, wenn die Neutronen aus den Spaltprozessen die Kettenreaktion alleine aufrechterhalten. Solche Kerne erfordern allerdings Eingriffs- bzw. Steuermöglichkeiten aus zwei entgegengesetzten Richtungen. Einerseits muss man die Zahl der Neutronen soweit kontrollieren können, dass sie nicht (exponentiell) steigt und eine Kernexplosion auslöst. Andererseits darf die Anzahl nicht zu weit reduziert werden, da sonst die Reaktionen zum Erliegen kommen. Das erhöht die Komplexität und somit auch die Fehleranfälligkeit solcher Reaktoren.

Das zweite Problem, jenes mit dem Brennstoff, liegt im sehr geringen Nutzungsgrad. Das führt u.a. dazu, dass ein Ausbau des Anteils der Kernenergie am Stromverbrauch unrealistisch wird. Durch einen derart erhöhten Verbrauch würden die Reichweiten auf Werte rund um die Lebensdauer eines KKW sinken, also in den Bereich von 60, eventuell gar nur 40 Jahren.

Das Abfall-Problem gliedert sich in zwei Teile. So muss der sogenannte „High-Level-Waste“ (HLW), also der am stärksten strahlende Anteil der radioaktiven Abfälle, in einem ersten Schritt zwischengelagert werden, bevor er nach der Abklingzeit weiter behandelt werden kann. Bei dem Abklingen handelt es sich um einen „Prozess“, dessen Dauer nicht beeinflusst werden kann, da sie ausschließlich von statistischen Kernprozessen abhängt.

Allerdings hat man es auch nicht eilig damit, da der HLW anschließend in ein Endlager verbracht werden muss. In einem solchen Endlager soll der Atommüll dann 100.000e Jahre sicher gelagert werden. Alle bisherigen Endlager sind daran bereits nach wenigen Jahren bzw. Jahrzehnten gescheitert. Ob die aktuellen Anläufe in Finnland und Schweden besser verlaufen, wird die Zukunft zeigen. Ob der extrem langen Lagerdauer sind Zweifel aber jedenfalls angebracht.

Diese Probleme sind natürlich auch der Atomlobby bekannt. Die Reaktionen und Lösungsansätze sind durchwegs sehr kreativ. So ist bereits seit Jahrzehnten neben dem Uran-Brennstoffkreislauf auch der Thorium-Brennstoffkreislauf bekannt. Thorium soll vor Allem die Reichweiten der Kernbrennstoffe erhöhen. Es sind auch einige Lagerstätten bekannt, insgesamt aber ist die Faktenlage derart unsicher, dass meist nicht zwischen Reserven und Ressourcen unterschieden wird.

Eine anders geartete Idee stellen die schnellen Reaktoren bzw. schnellen Brüter dar. Während in einem herkömmlichen Reaktor die Isotope Plutonium-239, Uran-235 und Uran-233 mit thermischen Neutronen (kinetische Energien im Bereich von 0,025 eV) gespalten werden,

werden in einem schnellen Reaktor schnelle Neutronen (kinetische Energien im Bereich von einigen MeV) genutzt, um auch „nicht spaltbares“ Material (z.B. Uran-238) zu „zertrümmern“.

Dieses „Zertrümmern“ ist mit jedem Kern möglich, allerdings mit wesentlich geringerem Wirkungsgrad als das Spalten mit thermischen Neutronen. Man benötigt also eine wesentlich höhere Neutronenflussdichte, kann aber den Brennstoffnutzungsgrad schon allein dadurch erhöhen, dass alle schweren Kerne, auch die minoren Actinoide, unter Energiefreisetzung „zertrümmert“ werden können.

Von der Abfall-Seite schließlich stammt ein weiterer kreativer Ansatz, nämlich die Transmutation. Unter Transmutation ist ganz allgemein die Umwandlung eines Kerns in einen anderen bzw. mehrere andere Kerne zu verstehen. Das kann auf zwei Arten geschehen, nämlich einerseits durch Neutroneneinfang bei leichten Kernen wie den Spaltprodukten, andererseits durch das „Zertrümmern“ großer bzw. schwerer Kerne wie beispielsweise der oben erwähnten minoren Actinoide. In diesem Fall spricht man von Incineration, also dem Verbrennen der schweren Kerne. Die Bezeichnung ist in dem Sinn gerechtfertigt, als dabei Energie frei wird, im Gegensatz zur Transmutation der Spaltprodukte. Die Transmutation insgesamt wird als die Lösung aller Abfallprobleme schlechthin verkauft.

Eine Kombination dieser Ansätze stellt das Konzept der beschleunigergetriebenen Reaktoren (accelerator driven reactors, ADR) dar. Durch den Einsatz einer externen (kontinuierlichen) Neutronenquelle, einer sogenannten Spallationsneutronenquelle (wobei Spallation das Zerschmettern schwerer Kerne durch Protonen oder ähnliche Teilchen zur Freisetzung von Neutronen bedeutet), muss die Kettenreaktion nicht durch Spaltungsneutronen aufrechterhalten werden. Das erlaubt ein sogenanntes unter- oder subkritisches Design des Reaktorkerns, in dem die Reaktionen zum Erliegen kommen, wenn die externe Neutronenquelle ausfällt.

Durch einen hohen Neutronenfluss und das – zumindest in den meisten Konzepten vorgesehene – schnelle Neutronenspektrum bieten ADR automatisch die Möglichkeit auch nicht spaltbares Material zu zertrümmern und steigern so auch den Brennstoffnutzungsgrad bzw. die Energieausbeute aus derselben Menge an Brennstoff.

Da dabei u.a. auch „unangenehme“ Nebenprodukte wie die bereits erwähnten minoren Actinoide, aber auch langlebige Spaltprodukte (longlived fission products, LFP) verbrannt bzw. transmutiert werden, gehen manche Befürworter der ADR sogar so weit zu behaupten, dass durch ADR Endlager obsolet werden.

3 Historische Entwicklung

Erste Ideen zu Beschleunigern, Spallation und Atomkraft stammen aus den 1950er Jahren. Diese zielten allerdings nicht auf die Energiegewinnung in unterkritischen Systemen ab, sondern auf das Brüten von spaltbarem und/oder waffenfähigem Material ab. Diese Untersuchungen wurden meist noch in den 1950er Jahren eingestellt, erlebten aber in den 1970ern eine Renaissance, die sich bis zur Jahrtausendwende hinzog.

In der Folge verliefen die Entwicklungen aber parallel bzw. unabhängig voneinander. Eine rasante Entwicklung erlebte ganz allgemein die Beschleuniger-Physik, und damit auch die linearen Beschleuniger (linear accelerator, LINAC).

Heute erreichen LINAC mit Protonen – die in den meisten ADR-Konzepten vorgesehenen Teilchen, obwohl auch Deuterium- oder Heliumkerne möglich wären – Leistungen im Bereich von Megawatt (MW). In Japan ist im JAEA-ADR-Konzept ein SRF proton LINAC (Superconducting Radio Frequency proton linear accelerator) vorgesehen, der 30 MW Strahlleistung bieten soll [5].

Die Entwicklung von Spallationsneutronenquellen nahm – wenn auch ursprünglich für andere Zwecke gedacht – Ende der 1970er/Anfang der 1980er Jahre Fahrt auf. Moderne Anlagen sind seit ca. 2000 in Betrieb, besonders nennenswert ist darunter die Spallation Neutron Source (SNS) am Oak Ridge National Laboratory im US-Bundesstaat Tennessee, die seit 2006 in Betrieb ist. Die European Spallation Source (ESS) im schwedischen Lund soll nach aktuellem Stand 2027 in Betrieb gehen.

Die Reaktoren werden aller Voraussicht nach blei- bzw. blei-bismut-gekühlt sein. Konzepte für schnelle bleigekühlte Reaktoren (lead-cooled fast reactor, LFR) werden der Generation IV zugerechnet. Es gibt einige Ähnlichkeiten mit Natrium-gekühlten schnellen Reaktoren (sodium-cooled fast reactor, SFR), aber beinahe keine praktischen Erfahrungen, abgesehen von russischen Atom-U-Booten. Ganz allgemein sollen die schnellen Reaktoren eine effizientere Brennstoffnutzung und gleichzeitig eine Abfallreduzierung ermöglichen. Im Fall der ADR ergeben sich durch Blei bzw. Blei-Bismut-Legierungen als Kühlmittel auch Synergien mit der Spallationsneutronenquelle.

In den 1990ern wurde schließlich an Konzepten für ADR gearbeitet. Mitte der 1990er wurde am CERN der Energy Amplifier (EA) entwickelt. Ende der 1990er nahm die Zahl der Forschungsaktivitäten deutlich zu, sodass es heute zahlreiche Konzepte zu ADR gibt. Der überwiegende Anteil davon ist aber nie über die Projektierungsphase hinausgekommen.

4 Bestandteile

Wie die meisten herkömmlichen Kraftwerke und vor Allem sämtliche KKW verfügen auch ADR über einen konventionellen Teil. Dieser Kraftwerksteil besteht aus einer Turbine, die einen Generator antreibt, wodurch es erst zur Stromgewinnung kommt. Der konventionelle Teil ist üblicherweise über einen sekundären, oft aber auch über den primären (bzw. einzigen) Kühlmittelkreislauf mit dem nuklearen Teil bestehend aus dem Reaktorkern und dem primären Kühlmittelkreislauf im Reaktorbehälter, verbunden.

In Abbildung 1 ist der Aufbau eines ADR schematisch dargestellt. In der Abbildung sind zusätzlich zu den herkömmlichen Teilen eines KKW noch ein Beschleuniger, ein Strahlfenster und das Spallationstarget (insgesamt die Spallationsneutronenquelle) zu sehen.

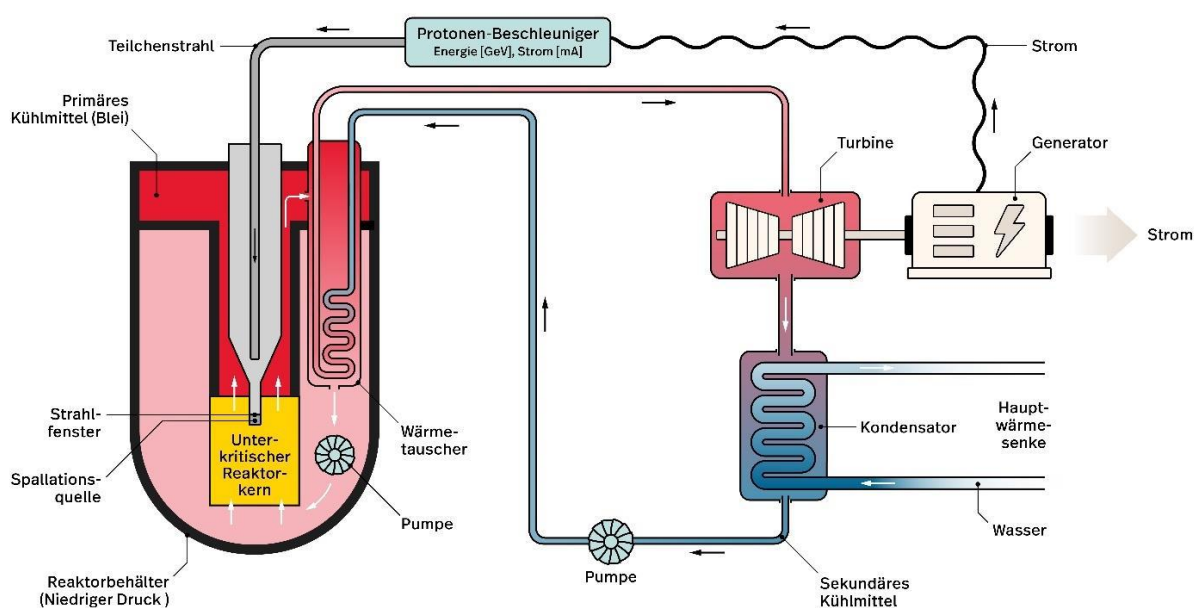


Abbildung 1: Schematische Darstellung eines ADR [1]

Ein weiteres Detail, das ebenfalls in Abbildung 1 dargestellt ist, ist der unterkritische Kern. Dieses unterkritische Design bringt große sicherheitstechnische Vorteile mit sich und ist daher ein besonders wichtiger Unterschied zwischen herkömmlichen KKW und ADR.

Im Folgenden werden jene Teile der ADR, die sich von den Bestandteilen herkömmliche KKW unterscheiden, näher behandelt. Diese Beschreibungen folgen im Wesentlichen den Darstellungen in „Analyse und Bewertung des Entwicklungsstands, der Sicherheit und des regulatorischen Rahmens für sogenannte neuartige Reaktorkonzepte“ [1], ergänzt durch Beiträge aus „Overview of ADS-Projects in the world“ [2], „Accelerator-driven sub-critical reactor system (ADS) for nuclear energy generation“ [3] und „Progress on SRF LINAC development for the accelerator driven subcritical system at JAEA“ [5].

4.1 Spallationsneutronenquelle

Die Spallationsneutronenquelle ist ein ganz wesentlicher Teil aller ADR-Konzepte. Erst durch sie wird das unterkritische Design möglich. Spallationsneutronenquellen bestehen immer aus einem Beschleuniger und einem Spallationstarget. Zusätzlich kann – und wird in den meisten Fällen – ein Strahlfenster vorgesehen werden, das das Vakuum des Teilchenbeschleunigers vom Spallationstarget trennt.

Das – verhältnismäßig einfache – Prinzip einer Spallationsneutronenquelle besteht darin, Teilchen zu beschleunigen und den Strahl auf ein Target, üblicherweise ein Schwermetall, zu fokussieren. Die (hochenergetischen) Teilchen zertrümmern die Kerne des Targets, wobei zahlreiche Neutronen freigesetzt werden. Dadurch wird in ADR der nötige Neutronenfluss ermöglicht.

4.1.1 Beschleuniger

Ein erstes Unterscheidungsmerkmal bei Teilchenbeschleunigern ist ihre räumliche Ausführung. So gibt es auf der einen Seite Kreisbeschleuniger (Synchrotron, Zyklotron), wie auch den Large Hadron Collider (LHC) am europäischen Kernforschungszentrum (centre européen recherche nucléaire, CERN). Die andere Variante stellen die Linearbeschleuniger (LINAC) dar.

Für den Einsatz in ADR haben LINAC einige Vorteile, u.a. betreffend die Entnahme und Fokussierung des Strahls. Sie sind darüber hinaus wesentlich weniger anfällig für Störungen – und im Falle von Störungen meist besser kontrollierbar. Da sämtliche Kernreaktionen im Reaktor bei Ausfall des Beschleunigers zum Erliegen kommen, sollte dieser möglichst lange, zumindest aber einige Monate lang ohne Unterbrechung betrieben werden können.

Eine weitere Frage ist jene nach den verwendeten Teilchen. In Frage kommen grundsätzlich alle geladenen Teilchen, wobei für die Freisetzung von Neutronen im Spallationstarget hauptsächlich Protonen, Deuterium und Helium in Betracht gezogen wurden. Aufgrund des Verhaltens im Beschleuniger und auch der Effizienz fällt die Wahl auf Protonen, auch wenn es durchaus Experimente mit Deuterium gibt [1].

Weitere Anforderungen an den Hochleistungs-Protonenbeschleuniger sind [3]:

- Strahlleistung von 10 MW oder mehr
- Teilchenenergien im GeV-Bereich
- kontinuierlicher Strahl (continuous wave, cw)
- robuster und zuverlässiger ganzjähriger Betrieb (99% Verfügbarkeit)
- minimale Strahlverluste im Beschleuniger (minimale Aktivierung der Komponenten, reduzierter Wartungsaufwand)
- hohe Umwandlungseffizienz ($\eta > 40\%$) von elektrischer in Strahlleistung

Aus heutiger Sicht wird die Wahl auf SRF LINACs wie den JAEA-SRF LINAC fallen. Zwar ist ein tatsächlich kontinuierlicher Strahl mit Wechselspannungsbeschleunigern nicht möglich, der Dauerstrichbetrieb kommt den Anforderungen aber sehr nahe. Die supraleitende Ausführung reduziert die (Wärme-) Verluste und erhöht insgesamt die Effizienz des LINAC.

In Tabelle 1 sind die charakteristischen Werte Teilchenenergie in GeV, Teilchenstrom in mA, Betriebsmodus und Strahlleistung in MW für die Beschleuniger aus den Forschungsprojekten CiADS, MYRRHA und JAEA-ADS zusammengefasst. Die Darstellung wird ergänzt durch den Neutronenmultiplikationsfaktor k_{eff} (< 1) und die thermische Leistung des Versuchsreaktors in MW [2].

	CiADS	MYRRHA	JAEA-ADS
Teilchenenergie (GeV)	0,5	0,6	1,5
Teilchenstrom (mA)	5	4	20
Betriebsmodus	cw/pulse	cw	cw
Strahlleistung (MW)	2,5	2,4	30
k_{eff}	0,75/0,96	0,95	0,97
thermische Leistung (MW)	7,5/9,7	50 – 100	800

Tabelle 1: wesentliche Parameter der LINACs und Reaktoren in den Forschungsprojekten CiADS, MYRRHA und JAEA-ADS [2]

Die in den aktuellen Forschungsprojekten bzw. -programmen vorgesehenen LINACs erfüllen also die grundlegenden Anforderungen. Den Zusammenhang mit der Spallation bzw. der Neutronenausbeute zeigt Abbildung 2.

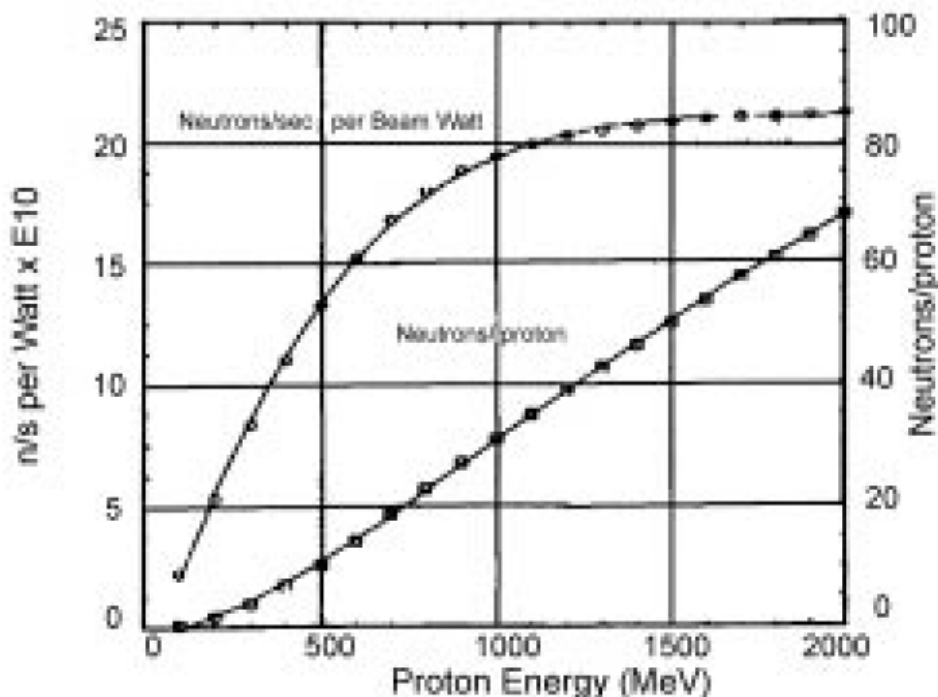


Abbildung 2: Neutronenausbeute je Proton in Abhängigkeit von der Protonenenergie und Neutronen/Sekunde mal Watt (Beschleuniger-Leistung) [3]

Dabei sind zwei wesentliche Abhängigkeiten zu sehen. Die Ausbeute an Neutronen je Proton ist in einem Bereich von rund 0,5 GeV bis 2 GeV linear. Im Forschungsbereich der drei oben angeführten Projekte ergeben sich Ausbeuten von rund 10 bis rund 50 Neutronen je Proton. Auffällig ist auch, dass die Neutronenausbeute pro Sekunde und Watt (Strahlleistung) bei hohen Teilchenenergien ($> 1\text{ GeV}$) abflacht. Dadurch wird die „sinnvolle“ Auslegung des LINAC nach oben begrenzt.

4.1.2 Spallationstarget

Grundsätzlich kommen schwere Elemente, vor Allem auch alle Schwermetalle, als Spallationstarget in Frage. Die Eignung als Spallationstarget wird hauptsächlich dadurch bestimmt, wie viele Neutronen – in Abhängigkeit von den Parametern des Teilchenstrahls – freigesetzt werden und in weiterer Folge im Reaktorkern Spaltreaktionen auslösen.

Da diese Anforderung am besten von einem kompakten Target erfüllt werden kann, waren frühe Spallationstargets meist aus festem Uran oder Wolfram. Es zeigt sich allerdings, dass diese Materialien für die weiteren Anforderungen nicht gut geeignet sind. So muss das Spallationstarget eine sehr hohe Wärmeleistung abführen können und zugleich beständig gegen sowohl die Bestrahlung als auch thermische Einflüsse sein.

Insgesamt muss das Spallationstarget

- möglichst viele Neutronen pro Proton bzw. pro Sekunde und Watt (Beam-Leistung) freisetzen,
- eine extrem hohe Wärmestromdichte (im Bereich von kW/cm^3) abführen können (ohne zu verdampfen) und
- der Bestrahlung und weiteren thermischen Einflüssen standhalten können.

Nach aktuellem Stand sowohl des Wissens als auch der Anforderungen sind flüssige Targets besser geeignet. Es erfolgte daher – auch aufgrund der niedrigen Schmelzpunkte – ein Übergang zu Blei, Blei-Bismut-Legierungen oder Quecksilber (Blei schmilzt bei 327°C , Bismut bei 271°C , das Eutektikum bei 124°C). Von besonderem Interesse sind dabei Blei bzw. Blei-Bismut-Legierungen, da in diesem Fall das Spallationstarget zugleich als Kühlmittel dienen kann.

4.1.3 Strahlfenster

Das Strahlfenster ist kein „Muss“ sondern vielmehr eine Ausführungsfrage. Seine Aufgabe besteht darin, das Hochvakuum des Beschleunigers vom Spallationstarget zu trennen. Die Spallationsneutronenquelle kann also auch ohne Strahlfenster realisiert werden, allerdings muss sich dann auch das Spallationstarget im Hochvakuum befinden. Dabei kommt es zwangsläufig zu Verunreinigungen des Vakuums durch Materialverdampfungen und den Austritt gasförmiger Spaltprodukte.

Das Strahlfenster zwischen Beschleuniger und Spallationstarget soll verhindern, dass diese Verunreinigungen den Betrieb des Beschleunigers stören. Es besteht aus zwei dünnen

Metallplatten (in vielen Konzepten ist Aluminium vorgesehen). Diese Platten sind dem hochenergetischen Teilchenstrahl ausgesetzt und müssen laufend gekühlt werden. Dennoch wird es zu Materialschäden und Verschleißerscheinungen kommen.

Schließlich reduziert das Strahlfenster auch die Neutronenausbeute, wenn auch nur geringfügig. Dass die ADR-Konzepte dennoch Strahlfenster vorsehen liegt vor Allem daran, dass der ungestörte, gleichmäßige Betrieb des Beschleunigers für die gesamte Anlage von wesentlicher Bedeutung ist. Auch Fehlerbehebungen und Wartungsarbeiten am Beschleuniger sind natürlich einfacher und schneller ausführbar, wenn das Spallationstarget nicht im Hochvakuum ist und dieses auch nicht verunreinigt.

4.2 Reaktor

Für den Reaktor bzw. sein finales Design gibt es zwei ganz wesentliche Faktoren, nämlich neben der Art der Einbindung der Spallationsneutronenquelle auch die Wahl des Kühlmittels. Vom Kühlmittel hängen hängt auch die Ausführung der Kühlmittelkreisläufe und damit die Anbindung des konventionellen Teils des ADR ab.

4.2.1 Kühlmittel

In der Kernfission bestimmt die Wahl des Kühlmittels das Reaktordesign – das gilt auch für ADR. Von den ursprünglich diskutierten Möglichkeiten (Natrium, Blei (-Bismut) und Helium) weisen alle Vor- und Nachteile auf. Insgesamt spricht vieles für Blei bzw. eine Blei-Bismut-Legierung. Damit kann auch der Reaktorkern in Anlehnung an die bleigekühlten schnellen Reaktoren (lead-cooled fast reactors, LFR) designt und auf die (wenigen) vorhanden Erfahrungen aus diesem Bereich zurückgegriffen werden.

Dabei hat der Einsatz von Blei bzw. einer Blei-Bismut-Legierung als Kühlmittel nicht nur den Vorteil zugleich als Spallationstarget dienen zu können. Hinzu kommt auch, dass Blei kaum Neutronen absorbiert und daher auch nicht aktiviert werden kann. Auch das Temperaturniveau sollte eine vergleichsweise effiziente Umwandlung von Wärme in Strom erlauben.

Auf der anderen Seite hat Blei auch einige Nachteile, darunter die hohe spezifische Dichte, die für einen ungewöhnlich schweren Reaktor sorgt.

4.2.2 Reaktorkern

Der Reaktorkern kann in ADR unterkritisch ausgeführt werden. „Unterkritisch“ ist dabei über den (Neutronen-) Multiplikationsfaktor k_{eff} definiert. Ist der Multiplikationsfaktor kleiner als 1, ist der Reaktor unter- bzw. subkritisch und die Kettenreaktion ist nicht selbsterhaltend. Mit der Unterkritikalität gehen also sicherheitstechnische Vorteile einher [3].

Die im Reaktor freigesetzte (thermische) Leistung ist abhängig von der Anzahl der Spaltreaktionen und somit von der Anzahl der Neutronen aus der Spallationsneutronenquelle. Da die Anzahl der Neutronen proportional zur Energie der beschleunigten Protonen ist, ist

auch die Leistung des Reaktors proportional zur Leistung des Beschleunigerstrahls (Energie der Protonen mal Protonenstrom) [1].

4.3 Brennstoff

Die allermeisten ADR-Konzepte sehen ein schnelles Neutronenspektrum vor. Das ist für die Wahl des Brennstoffs sehr vorteilhaft, da es alle Möglichkeiten offenlässt, während mit moderierten thermischen (langsamen) Neutronen die Einschränkung auf Thorium (Uran-233) und Uran (Uran-235, Plutonium-239) einhergeht.

Die aktuellen Diskussionen zum Brennstoffthema drehen sich dennoch um die üblichen Brennstoffe, und zwar hauptsächlich aufgrund der jahrzehntelangen Erfahrungen damit. Obwohl Thorium an Erfahrungswerten nicht mit Uran mithalten kann, ist es die wahrscheinlichste Wahl als Brennstoff. Das liegt auch daran, dass aufgrund der leistungsfähigen externen Neutronenquelle Thoriumreaktoren ohne zusätzliches spaltbares Material in Betrieb genommen werden können.

Neben Überlegungen zu Uran und MOX-Brennstoffen gibt es auch Konzepte, die auf bereits genutzten Brennstoff zurückgreifen wollen. Dadurch soll auch das Atommüll- bzw. Endlagerproblem reduziert werden [4].

5 Forschungsprojekte im Zusammenhang mit ADR

Schon aufgrund der Zusammensetzung von ADR gab und gibt es drei Forschungsbereiche von besonderer Bedeutung, und zwar die Beschleuniger, das Spallationstarget (inklusive der hohen Anforderungen an die Wärmeabfuhr) und die Reaktorkonfiguration.

Neben diesen grundlegenden Bereichen spielen auch die Kopplung von Spallationsneutronenquelle und Reaktor sowie Forschung zu Transmutation und Incineration eine Rolle. Ersteres ist dabei von offensichtlichem Interesse für den – erhofften – Betrieb von ADR, während letzteres durch spezielle Eigenschaften von ADR – nicht zuletzt aufgrund des schnellen Neutronenspektrums – möglich wird, aber auch zu den versprochenen Vorteilen der ADR gegenüber herkömmlichen Reaktoren der Generation III zählen soll.

Zu den wichtigsten (Forschungs-) Projekten im Zusammenhang mit beschleunigergetriebenen Systemen (ADS) und damit auch im Zusammenhang mit ADR zählen die folgenden [1], [2]:

1. FEAT (CERN)
2. TARC (CERN)
3. ADANES (China)
4. CiADS (China)
5. CLEAR (China)
6. EFIT (EU)
7. MUSE (Frankreich)
8. TRAD (Italien)
9. TEF-P (Japan)
10. TEF-T (Japan)
11. ARTMS (Kanada)
12. ADS (Russland)
13. SAD (Russland)
14. MEGAPIE (Schweiz)
15. U-ADS (Ukraine)
16. YALINA (Weißrussland)
17. MYRRHA (Belgien, EU)

In dieser Liste finden sich sowohl laufende (bzw. reaktivierte) als auch abgeschlossene (bzw. abgebrochene) Projekte. Darüber hinaus gibt es Projekte, die bisher nur „vorgeschlagen“ wurden. Bei diesen Projekten sind meist die Finanzierung sowie teilweise auch der gesamte Ablauf bzw. die Projektstruktur noch nicht gesichert. Bei dem Projekt U-ADS in der Ukraine ist der aktuelle Status nicht bekannt.

Die hier gelisteten Projekte beschäftigen sich alle bereits mit ADR. Die Forschungsbereiche reichen dabei von der Reaktorphysik (insbesondere mit schnellem Neutronenspektrum, z.B. FEAT) über die Kopplung von Spallationsneutronenquelle und subkritischem Reaktor (z.B. TEF-P) bis hin zur Entwicklung einer kommerziellen Anlage (z.B. EFIT).

Bei manchen Projekten wurde auch spezieller Fokus auf den Brennstoff oder die Transmutation (inkl. Incineration der Actinoide und Nutzung des HLW anderer Anlagen) der Spaltprodukte gelegt.

Im Folgenden werden jene Projekte bzw. (Forschungs-) Programme etwas näher beschrieben, die nach Pisters et al. [1] die wichtigsten Rollen spielen.

5.1 EFIT

Die European Facility for Industrial Transmutation of Minor Actinides (EFIT) ist eine konzeptionelle Auslegungsstudie. Basierend auf Vorgängerstudien und Ergebnissen aus MYRRHA wird der Reaktorkern unterkritisch ($k_{\text{eff}} = 0,97$) ausgelegt. Ein Kühlmittel ist eine eutektische Blei-Bismut-Legierung, die thermische Leistung beträgt 400 MW. Der Beschleuniger liefert bei 16 MW Strahlleistung Protonen mit 0,8 GeV.

Mit diesen Eckdaten hat EFIT vor Allem das Ziel zu untersuchen, ob bzw. wie weit bei einer ausgeglichenen Plutoniumbilanz minore Actinoide „verbrannt“ werden können. Die Ergebnisse scheinen durchaus positiv zu sein. Allerdings soll die industrielle Anlage – selbst unter sehr optimistischen Annahmen – nicht vor 2040 in Betrieb gehen können.

5.2 CLEAR

Der China Lead-based Research Reactor (CLEAR-I) ist einer von zwei in China geplanten Experimentalreaktoren. CLEAR-I wird ein schneller, Blei-Bismut-gekühlter Reaktor, der sowohl kritisch als auch unterkritisch betreiben werden kann. Er soll vor Allem unterschiedliche Brennstoffe bzw. Brennstoffzusammensetzungen testen.

Im Rahmen dieses Programms wurde u.a. auch die Blei-Bismut-Experimentieranlage KYLIN-II gebaut, die – ohne nukleares Inventar – über 30.000 Stunden in Betrieb war. Bei diesen Tests wurde das Verhalten des Kühlmittels untersucht, um Erfahrungen mit dem außergewöhnlich hohen Gewicht und auch dem Erstarren durch Abkühlen zu gewinnen. Auch ein virtueller Reaktor (CLEAR-V) wurde entwickelt.

5.3 CiADS

Bei dem China initiative Accelerator Driven System (CiADS) handelt es sich ebenfalls um einen Blei-Bismut-gekühlten Experimentalreaktor. Er soll einerseits der Transmutationsforschung, andererseits der Beschleunigerentwicklung bis hin zur Systemkopplung dienen. Erwähnenswert ist auch, dass die Kerneintritts- und -austrittstemperatur bei 280°C und 380°C liegen werden, um die Korrosion gering zu halten.

5.4 MYRRHA

Das Projekt MYRRHA (Multipurpose hybrid Research Reactor for High-tech Applications) ist das am weitesten fortgeschrittene Projekt (oder eigentlich Forschungsprogramm) im Bereich

der ADR. Erste Konzepte stammen aus den 1990ern. MYRRHA soll das ADR-Konzept – also die Verbindung von Beschleuniger, Spallationstarget und (subkritischem) Reaktor bei niedriger Leistung demonstrieren. Darüber hinaus soll MYRRHA – neben Bestrahlungsexperimenten, Brennstoff- und Materialentwicklung – auch der Transmutationsforschung dienen.

Allgemeines Ziel ist das Sammeln von Erfahrungen mit bleigekühlten Reaktoren, und zwar sowohl im unterkritischen als auch im kritischen Betrieb. Elektrischer Strom soll allerdings nicht gewonnen werden.

Anlagenkonzept

Laut MYRRHA-Design soll ein Linearbeschleuniger Protonen mit einer Energie von 600 MeV und einem Strom von bis zu 4 mA bei einer Gesamtleistung von bis zu 2,4 MW zur Verfügung stellen. Das Spallationstarget besteht aus einer Blei-Bismut-Legierung. Der Reaktor wird mit einer Blei-Bismut-Legierung gekühlt und soll eine Leistung von 100 MW_{th} zur Verfügung stellen.

Der Reaktorkern besteht aus 211 Positionen für Brennelemente sowie Kontroll- und Abschaltstäbe (da MYRRHA auch in kritischer Konfiguration betrieben werden kann). Da auch im kritischen Betrieb maximal 108 Brennelemente (im subkritischen 72) vorgesehen sind, bleibt Platz für u.a. Beobachtungselemente. Die Brennelemente werden MOX-Brennstoff mit einem Plutonium-Gehalt von 30% bis 35% enthalten.

Zeitschienen und Kosten

Das seit 2009 verfolgte (und oben beschriebene) MYRRHA-FASTEF, also der erste (Demo-) ADR hätte ursprünglich 2020 in Betrieb gehen sollen. Es kam aber mehrfach zu Verschiebungen bzw. Änderungen des Zeitplans. Der 2018 veröffentlichte aktuelle Zeitplan sieht ein Vorgehen in drei Phasen vor, wobei der Reaktor mit der Spallationsneutronenquelle in der dritten Phase bis 2036 errichtet werden soll.

Wesentliche Gründe für die Verzögerungen dürften in der unsicheren Finanzierung zu finden sein. Belgien soll bereit sein 40% der Kosten zu tragen, allerdings hat sich in den letzten 10 bis 20 Jahren keine Staatengemeinschaft gefunden, die bereit wäre die weiteren 60% zu finanzieren.

5.5 Zusammenschau

Die unterschiedlichen Projekte und die dazu bekannten Daten und Fakten zeigen, dass die Forschung an ADR schon weit fortgeschritten ist. Von kommerziellen Reaktoren ist man noch weit entfernt. Aktuell kommt es darüber hinaus zu Verzögerungen, die u.a. auch den geplanten Demoreaktor im MYRRHA-Projekt betreffen (der der erste seiner Art werden soll).

Die aktuellen Schwerpunkte liegen in der Perfektionierung der Beschleuniger und der Systemkopplung. Bezüglich schneller Reaktoren und auch Blei-(Bismut-)Kühlung stammen die meisten Erfahrungswerte allerdings von kritischen Reaktoren – und auch hier gehen die

praktischen Erfahrungen nicht über das Forschungsstadium hinaus (abgesehen von russischen U-Booten).

Sehr interessant, auch hinsichtlich des weiteren Forschungsfeldes Transmutation und Incineration, ist das Projekt EFIT. Im Rahmen dieses Projekts konnte die Incineration der minoren Actinoide demonstriert werden – und zwar unter Energiegewinnung.

Experten gehen davon aus, dass ein kommerzieller Einsatz frühestens 2040 möglich sein wird und vorab noch intensive Forschungsarbeit geleistet werden muss. Ob dieser anscheinend sehr positiven Resultate ist fraglich, weshalb die Forschung vergleichsweise ins Stocken geraten ist. So ist es aktuell nicht möglich die Finanzierung von MYRRHA aufzustellen.

Das überrascht vor Allem, wenn man andere Bereiche der Kernenergie betrachtet. So gibt es weltweit Unternehmen, etwa im Bereich der SMR, die allem Anschein nach keine Probleme haben, auch staatliche Förderungen zu akquirieren. Man sollte annehmen, dass Staaten hier der erhöhten Sicherheit und der Reduktion des Abfallproblems den Vorzug geben würden, was aber nicht der Fall ist.

6 Transmutation und Incineration

Unter Transmutation versteht man die Umwandlung von Atomkernen in andere Kerne, sei es ein anderes Isotop desselben Elements oder auch ein anderes Element. Von großem Interesse ist die Transmutation im Zusammenhang mit der Kernenergie, da man sich erhofft sowohl die langlebigen Spaltprodukte (longlived fission products, LFP) als auch die Transurane, ganz besonders die minoren Actinoide, durch Transmutation in „harmlosere“ Teilchen umwandeln und so den nötigen Aufwand zur Behandlung und Lagerung des Atommülls deutlich reduzieren zu können.

Die Mechanismen, die zur Transmutation führen, unterscheiden sich allerdings deutlich für die zu transmutierenden Kerne. So sind die LFP als vergleichsweise leichte Kerne auf Neutroneneinfang angewiesen um derart ihre Zerfallseigenschaften zu ändern. Da der Wirkungsquerschnitt für Neutroneneinfang mit der Neutronenenergie stark abnimmt, sind die Bedingungen in einem ADR für die Transmutation der LFP nicht wirklich gut geeignet.

Anders sieht das aus für die Transmutation der minoren Actinoide. Bei den minoren Actinoiden – Neptunium, Americium, Curium, Berkelium, Californium, Einsteinium und Fermium – handelt es sich hingegen um schwere Elemente. Hinzu kommt, dass die minoren Actinoide im Gegensatz zu Uran-233, Uran-235 und Plutonium-239 nicht durch Neutroneneinfang gespalten werden können, sie in herkömmlichen KKW mit thermischem Neutronenspektrum im abgebrannten Brennstoff angehäuft werden und zur Radiotoxizität erheblich beitragen.

Wie alle schweren Kerne können aber auch die minoren Actinoide mit schnellen Neutronen zertrümmert werden. Auch diese Umwandlung ist eine Art der Transmutation. Da dabei aber auch Energie frei wird, die in einem entsprechenden KKW genutzt werden kann, spricht man häufig von Incineration (also dem „Verbrennen“) der minoren Actinoide.

Durch die Neutronenquelle und das schnelle Spektrum wären ADR besser für Incineration der minoren Actinoide geeignet als herkömmliche Reaktoren, die ein thermisches Neutronenspektrum aufweisen. Das Projekt EFIT (siehe Kapitel 5.1) zeigt, dass die Incineration durchaus gut funktionieren kann. Auf dieser Tatsache beruht auch die (absurde) Idee, dass Staaten, die über keine Endlager verfügen (also eigentlich alle Staaten), besonderes Interesse an ADR zur Verringerung der Radiotoxizität ihres „high level waste“ (hochradioaktiver Abfall, der besonders behandelt werden muss) haben könnten und die Stromgewinnung quasi nur ein Bonus wäre.

7 Fazit

ADR haben gegenüber herkömmlichen KKW durchaus Vorteile bzw. positive Eigenschaften, allen voran die Möglichkeit dank der externen Neutronenquelle in einem subkritischen Design ausgelegt und betrieben werden zu können.

Zwei Seiten haben hingegen die Versprechungen zur Transmutation. Für die Umwandlung der LFP stellt das schnelle Neutronenspektrum eher eine Hürde dar. Die Incineration der minoren Actinoide müsste hingegen funktionieren, und zwar nicht nur aufgrund des schnellen Neutronenspektrums, sondern auch aufgrund des hohen Neutronenflusses.

Dieser Neutronenfluss stellt auch aus materialwissenschaftlicher Sicht ein Problem dar. Zwar kann das Kühlmittel (selbst eine Blei-Bismut-Legierung) kaum aktiviert werden, für die weiteren Materialien im bzw. um den Kern gilt das aber nicht.

Abgesehen vom unterkritischen Design gibt es keine gewichtigen Vorteile gegenüber den bleigekühlten schnellen Reaktoren (LFR). Und dieses Konzept hat gegenüber den wassergekühlten Reaktoren der dritten Generation bisher den Kürzeren gezogen – aus vielerlei Gründen, die auch auf ADR im entsprechenden Design zutreffen.

Erschwerend kommt natürlich noch der zusätzliche Aufwand für die Spallationsneutronenquelle, und hier vor Allem für den Beschleuniger, hinzu. Dieser Aufwand schlägt sich auf zwei Arten nieder, einerseits mit höherem Wartungsaufwand (der wiederum Kosten verursacht) und andererseits in deutlich höheren Errichtungskosten.

Dieser zusätzliche finanzielle Aufwand dürfte auch (zumindest mit-) verantwortlich dafür sein, dass das Aufstellen von Fördergeldern für ADR außergewöhnlich schwer ist. Einzelstaaten und auch die EU sind hier eher zurückhaltend, von privaten Investoren ist überhaupt nichts zu hören.

Insgesamt gibt es also wenig Vorzüge (Sicherheit, Brennstoffnutzung, Incineration, ...) gegenüber herkömmlichen Reaktoren, aber auch einige Nachteile (zusätzlicher Aufwand, hoher Neutronenfluss, ...). Und selbstverständlich sprechen alle Nachteile, Risiken und Gefahren, die mit der Kernfission einhergehen auch gegen ADR!

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schematische Darstellung eines ADR [1].....	10
Abbildung 2: Neutronenausbeute je Proton in Abhängigkeit von der Protonenenergie und Neutronen/Sekunde mal Watt (Beschleuniger-Leistung) [3].....	12

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: wesentliche Parameter der LINACs in den Forschungsprojekten CiADS, MYRRHA und JAEA-ADS [2].....	12
--	----

Glossar

Begriff	Erläuterung
A	Ampere (SI-Einheit der Stromstärke, $1 \text{ A} = 1 \text{ C/s} = 6,2 \times 10^{18} \text{ e/s}$)
ADR	accelerator driven reactor, Beschleunigergetriebener Reaktor
ADS	accelerator driven system, Beschleunigergetriebenes System
C	Coulomb (SI-Einheit der elektrischen Ladung)
CERN	centre européen recherche nucléaire, europäisches Kernforschungszentrum
CiADS	China initiative Accelerator Driven System
CLEAR-I	China Lead-based Research Reactor
cw	continous wave, kontinuierlicher Strahl
e	Elementarladung ($1 \text{ e} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$)
EA	Energy Amplifier
EFIT	European Facility for Industrial Transmutation of Minor Actinides
ESS	European Spallation Source (in Lund, Schweden)
eV	Elektronvolt (Energieeinheit, $1 \text{ eV} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ J}$)
HLW	high-level-waste, hoch radiotoxischer Abfall
Incineration	Zertrümmern („Verbrennen“) schwerer Kerne, v.A. minorer Actinoide
KKW	Kernkraftwerk
LFP	longlived fission products, langlebige Spaltprodukte
LFR	lead-cooled fast reactor, bleigekühlter schneller Reaktor
LHC	large hadron collider
LINAC	linear accelerator, linearer Beschleuniger
minore Actinoide	bestimmte Transurane (v.A. Neptunium, Americium, Curium), die die Behandlung des Atommülls erschweren und/oder Endlagerung erforderlich machen

Begriff	Erläuterung
MOX-Brennstoff	Mixed oxid fuel, Mischoxid-Brennstoff (aus Plutonium und Uran)
MYRRHA	Multipurpose hYbrid Research Reactor for High-tech Applications
Reserven	nachgewiesene, mit heutiger Technik wirtschaftlich abbaubare Rohstoffmengen
Ressourcen	mit heutiger Technik und/oder wirtschaftlich nicht abbaubare oder nur vermutete Rohstoffmengen
schnelle Neutronen	energiereiche Neutronen mit kinetischen Energien im Bereich von keV bis MeV
schnelle Reaktoren	Reaktoren, in denen schnelle Neutronen genutzt werden (statt thermischen Neutronen mit Energien von rund 0,025 eV)
schnelle Brüter	schnelle Reaktoren, in denen neuer Brennstoff erbrütet wird
SFR	sodium-cooled fast reactor, natriumgekühlter schneller Reaktor
SMR	small modular reactor, kleiner modularer Reaktor
SNS	Spallation Neutron Source (Oak Ridge National Laboratory, USA)
Spallation	Zerschmettern schwerer Kerne zur Freisetzung von Neutronen
SRF LINAC	superconducting radio frequency LINAC, supraleitender Hochfrequenzbeschleuniger
Transmutation	Umwandlung von Kernen durch Zertrümmern oder Neutroneneinfang
W	Watt (SI-Einheit der Leistung)
W_{th}	Watt thermisch (thermische Leistung)
η	Wirkungsgrad

Quellenverzeichnis

- [1] Pistner, C. et al. (2024): **Analyse und Bewertung des Entwicklungsstands, der Sicherheit und des regulatorischen Rahmens für sogenannte neuartige Reaktorkonzepte**; Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung, Berlin; urn:nbn:de: 0221-2024030542046
- [2] Yee-Rendon, B. (2022): **Overview of ADS-Projects in the world**; Japan Atomic Energy Agency (JAEA), Tokai, Japan; 31st Int. Linear Accel. Conf. LINAC2022 (Seiten 310 bis 313), Liverpool, UK JACoW Publishing; ISBN: 978-3-95450-215-8; ISSN: 2226-0366; doi:10.18429/JACoW-LINAC2022-TU2AA01
- [3] Kapoor, S. S. (2002): **Accelerator-driven sub-critical reactor system (ADS) for nuclear energy generation**; PRAMANA – journal of physics (Vol. 59, No. 6, Seiten 941 bis 950), Indian Academy of Sciences; DAE-Homi Bhabha Chair Professor, BARC, Trombay, Mumbai 400 085, India
- [4] Nifenecker, H. et al. (2001): **Basics of accelerator driven subcritical reactors (Review)**; Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 463 (Seiten 428 bis 467)
- [5] Yee-Rendon, B. et al. (2021): **Progress on SRF LINAC development for the accelerator driven subcritical system at JAEA**; Japan Atomic Energy Agency (JAEA), Tokai, Japan; 20th Int. Conf. on RF Superconductivity SRF2021 (Seiten 372 bis 375), East Lansing, MI, USA JACoW Publishing; ISBN: 978-3-95450-233-2; ISSN: 2673-5504; doi:10.18429/JACoW-SRF2021-TUPFAV001
- [6] International Atomic Energy Agency (2015): **Status of Accelerator Driven Systems Research and Technology Development**; IAEA-TECDOC-1766; IAEA TECDOC SERIES; Wien