

EUR 1687.d

REPRINT

EUROPÄISCHE ATOMGEMEINSCHAFT - EURATOM

DIE NUKLEARE CÄSIUM-ZELLE

von

H. NEU

1964



Gemeinsame Kernforschungsstelle
Forschungsanstalt Ispra - Italien
Abteilung Direkte Konversion

Sonderdruck aus
„KERNTÉCHNIK, ISOTOPENTÉCHNIK UND -CHEMIE“
5. Jahrgang, Heft 9 - 1963

HINWEIS

Das vorliegende Dokument ist im Rahmen des Forschungsprogramms der Kommission der Europäischen Atomgemeinschaft (EURATOM) ausgearbeitet worden.

Es wird darauf hingewiesen, dass die Euratomkommission, ihre Vertragspartner und alle in deren Namen handelnden Personen :

- 1^o — keine Gewähr dafür übernehmen, dass die in diesem Dokument enthaltenen Informationen richtig und vollständig sind oder dass die Verwendung der in diesem Dokument enthaltenen Informationen oder der in diesem Dokument beschriebenen technischen Anordnungen, Methoden und Verfahren nicht gegen gewerbliche Schutzrechte verstößt;
- 2^o — keine Haftung für die Schäden übernehmen, die infolge der Verwendung der in diesem Dokument enthaltenen Informationen oder der in diesem Dokument beschriebenen technischen Anordnungen, Methoden oder Verfahren entstehen könnten.

This reprint is intended for restricted distribution only. It reproduces, by kind permission of the publisher, an article from "KERNTECHNIK, ISOTOPENTECHNIK UND -CHEMIE", 5. Jahrgang, Heft 9 - 1963, 365-372. For further copies please apply to Verlag Karl Thiernig KG 8 — München 9 - Pilgersheimer Strasse (Deutschland).

Dieser Sonderdruck ist für eine beschränkte Verteilung bestimmt. Die Wiedergabe des vorliegenden in „KERNTECHNIK, ISOTOPENTECHNIK UND -CHEMIE“, 5. Jahrgang, Heft 9 - 1963, 365-372 erschienenen Aufsatzes erfolgt mit freundlicher Genehmigung des Herausgebers. Bestellungen weiterer Exemplare sind an den Verlag Karl Thiernig KG 8 — München 9 - Pilgersheimer Strasse (Deutschland), zu richten.

Ce tiré-à-part est exclusivement destiné à une diffusion restreinte. Il reprend, avec l'aimable autorisation de l'éditeur, un article publié dans «KERNTECHNIK, ISOTOPENTECHNIK UND -CHEMIE», 5. Jahrgang, Heft 9 - 1963, 365-372. Tout autre exemplaire de cet article doit être demandé à Verlag Karl Thiernig KG 8 — München 9 - Pilgersheimer Strasse (Deutschland).

Questo estratto è destinato esclusivamente ad una diffusione limitata. Esso è stato riprodotto, per gentile concessione dell'Editore, da «KERNTECHNIK, ISOTOPENTECHNIK UND -CHEMIE», 5. Jahrgang, Heft 9 - 1963, 365-372. Ulteriori copie dell'articolo debbono essere richieste a Verlag Karl Thiernig KG 8 — München 9 - Pilgersheimer Strasse (Deutschland).

Deze overdruk is slechts voor beperkte verspreiding bestemd. Het artikel is met welwillende toestemming van de uitgever overgenomen uit „KERNTECHNIK, ISOTOPENTECHNIK UND -CHEMIE“, 5. Jahrgang, Heft 9 - 1963, 365-372. Meer exemplaren kunnen besteld worden bij Verlag Karl Thiernig KG 8 — München 9 - Pilgersheimer Strasse (Deutschland).

EUR 1687.d

REPRINT

THE NUCLEAR CESIUM CELL by H. NEU.

European Atomic Energy Community - EURATOM.
Joint Nuclear Research Center - Ispra Establishment (Italy).
Direct Conversion Service.
Reprinted from "Kerntechnik, Isotopentechnik und Chemie".
Vol. 5, No. 9 - 1963, pages 365-372.

A nuclear cesium cell is a cesium vapor filled energy converter for direct conversion of nuclear heat to electricity by thermionic emission of electrons. There are presented some general lines for designing and construction of cells and the selection of useful materials. A short review about inpile tests in USA and Europe is given. A critical discussion of the results as well as the development goals is followed by some remarks on the application of nuclear cesium cells in a thermionic reactor for space flight and for commercial electric power production.

EUR 1687.d

REPRINT

THE NUCLEAR CESIUM CELL by H. NEU.

European Atomic Energy Community - EURATOM.
Joint Nuclear Research Center - Ispra Establishment (Italy).
Direct Conversion Service.
Reprinted from "Kerntechnik, Isotopentechnik und Chemie".
Vol. 5, No. 9 - 1963, pages 365-372.

A nuclear cesium cell is a cesium vapor filled energy converter for direct conversion of nuclear heat to electricity by thermionic emission of electrons. There are presented some general lines for designing and construction of cells and the selection of useful materials. A short review about inpile tests in USA and Europe is given. A critical discussion of the results as well as the development goals is followed by some remarks on the application of nuclear cesium cells in a thermionic reactor for space flight and for commercial electric power production.

EUR 1687.d

REPRINT

THE NUCLEAR CESIUM CELL by H. NEU.

European Atomic Energy Community - EURATOM.
Joint Nuclear Research Center - Ispra Establishment (Italy).
Direct Conversion Service.
Reprinted from "Kerntechnik, Isotopentechnik und Chemie".
Vol. 5, No. 9 - 1963, pages 365-372.

A nuclear cesium cell is a cesium vapor filled energy converter for direct conversion of nuclear heat to electricity by thermionic emission of electrons. There are presented some general lines for designing and construction of cells and the selection of useful materials. A short review about inpile tests in USA and Europe is given. A critical discussion of the results as well as the development goals is followed by some remarks on the application of nuclear cesium cells in a thermionic reactor for space flight and for commercial electric power production.



Die nukleare Cäsium-Zelle

Von H. Neu Euratom, Gemeinsames Forschungszentrum, Ispra (Varese), Italien

1. Einleitung

Der Thermionic-Konverter findet wahrscheinlich seine interessanteste Anwendung im Zusammenhang mit einem Reaktor zur direkten Umwandlung der Kernspaltungswärme in elektrische Energie [1, 2]. Das kann in der einfachsten Weise so geschehen, daß man die Konverter-Elemente außerhalb eines Reaktors konventioneller Bauart in einem speziellen Wärmetauscher unterbringt; ein Primärkreis führt den Konvertern die Wärme zu, ein Sekundärkreislauf führt die nicht umgewandelte Wärme ab [3]. Oder man ordnet die Konverter an der Oberfläche des Reaktorkerns an und strahlt die nicht umgewandelte Wärme direkt von dem Kollektor des Konverters ab, was aber nur in Raumfahrzeugen sinnvoll ist [4, 5]. Wenn auch diese Möglichkeiten keinesfalls uninteressant sind, die bessere, wenn auch schwierigere Lösung ist, die Konverter-Elemente direkt in den Kern des Reaktors zu setzen. Nur diese Lösung soll hier behandelt werden. Innerhalb des Reaktors verwendbare Konverter werden kurz als *nukleare Konverter* bezeichnet.

Im Prinzip können als nukleare Zellen sowohl die mit Cäsiumdampf gefüllten Thermionic-Konverter [6] (Cäsium-Zellen) als

auch die mit Edelgas gefüllten und mit einer Hilfsentladung arbeitenden Konverter [7] (Edelgas-Konverter) dienen. Jedoch bestehen nach unserer Ansicht wenig Chancen für eine technische Realisierung des *nuklearen* Edelgas-Konverters wegen seiner relativ komplizierten Struktur (dritte Elektrode) und der Schwierigkeit, Gas und Elektroden von Verunreinigungen frei zu halten. Bestrahlungsversuche mit Edelgas-Zellen hatten das unerwartete Ergebnis, daß die Zellen nach kurzer Zeit als Cäsium-Zellen arbeiteten [8]; bei der Uran-spaltung wird nämlich relativ viel Cäsium gebildet, das in den Entladungsraum diffundiert. Als *nuklearer* Thermionic-Konverter scheint nur die Cäsium-Zelle aussichtsreich zu sein. Die Realisierung der nuklearen Cäsium-Zelle ist mit ungewöhnlich schwierigen technologischen Problemen verbunden, die etwa vergleichbar sind mit denen des bekannten Rover-Projekts (nuklearer Raketen-Antrieb). Seit dem ersten Versuch im April 1959 in den Los-Alamos-Laboratorien [1] ist es trotz intensiver Bemühungen in verschiedenen Laboratorien bisher nicht gelungen, über das Anfangsstadium hinauszukommen.

2. Einzelteile und Geometrie der Zellen

Eine nukleare Cäsium-Zelle besteht wie jeder Thermionic-Konverter aus einem Emitter (Kathode), einem Kollektor (Anode) und einem elektrischen Isolator zur mechanischen Verbindung der beiden Elektroden. Alle Teile sind dem Neutronenfluß und der Kernstrahlung des Reaktors ausgesetzt. Der Emitter enthält entweder selbst den spaltbaren Kernbrennstoff, oder er steht in direktem Wärmekontakt mit dem Kernbrennstoff. Die nicht umgewandelte Wärme wird am Kollektor durch eine Kühlflüssigkeit abgeführt.

Die geometrische Form der Zelle und ihre Anordnung sind bedingt durch die Notwendigkeit, eine große Zahl von Zellen elektrisch in Serie zu schalten. Es ist dabei zu beachten, daß Wärmeverluste und elektrische Verluste der Verbindungen auf ein Minimum reduziert werden.

Grundsätzlich stehen zwei Geometrien zur Diskussion, die zylindrische und die ebene.

a) In der *zylindrischen Anordnung* ist der Emitter konzentrisch von dem Kollektor umgeben. Sind, wie in Abb. 1 skizziert, mehrere Zellen in Serie geschaltet, so bildet ein zylindrischer Keramik-Ring zwischen je zwei Kollektoren den elektrischen Isolator. Der Raum zwischen Emitter, Kollektor und Keramik-Ring jeder Zelle ist mit einem Cäsium-Plasma gefüllt. Der Druck des Cäsiumdampfes im Entladungsraum wird durch die Wandtemperatur eines gemeinsamen Cäsium-Reservoirs bestimmt.

Die Abmessungen der elektrischen Verbindung zweier in Serie geschalteter Zellen müssen so gewählt werden, daß einerseits der Wärmefluß zwischen dem heißen Emitter und dem kühleren Kollektor nicht zu groß, andererseits die in der Verbindung erzeugte Joulesche Wärme möglichst klein bleibt.

Ein Reaktor-Element, das innerhalb des Kerns eines Reaktors etwa die gleiche Funktion — vom Standpunkt des Neutronenhaushalts — einnimmt wie die bekannten Brennstoffelemente des heterogenen Reaktors, würde aus einer gewissen Anzahl übereinander angeordneter Zellen bestehen. Aus Gründen der mechanischen Stabilität ist eine alle Zellen eines Elements umfassende Metallhülle vorzusehen. Das wiederum macht eine elektrische Isolierschicht zwischen den Kollektoren und der äußeren Hülle notwendig, da sonst die Zellen elektrisch kurz geschlossen würden.

b) Die *ebene Geometrie* führt bei einer Serienschaltung von Zellen zwangsläufig zu einer Art Sandwich-Anordnung mit

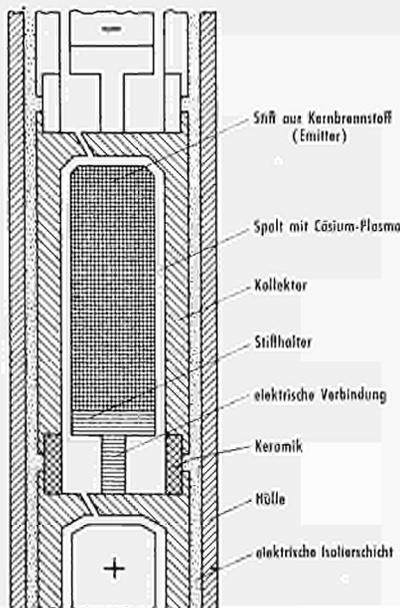


Abb. 1: Nukleare Cäsium-Zelle mit zylindrischer Geometrie, geeignet für Serienschaltung

einer in Abb. 2 angegebenen Schaltung der Elektroden. Es scheint aber schwierig zu sein, eine Lösung des Problems der mechanischen Verbindung der Emitter (+) und Kollektoren (-) und der Kühlung der Kollektoren zu finden. Dabei ist zu berücksichtigen, daß die Keramiken einerseits auf einer Temperatur oberhalb der des Cäsium-Reservoirs (250 bis 300 °C) gehalten werden müssen, andererseits diese Keramiken die hohen Temperaturen der Emitter (1800 bis 2000 °C) keinesfalls vertragen. Da offenbar noch niemand eine vernünftige Lösung des Halterungsproblems gefunden hat, bezieht sich das folgende nur auf die zylindrische Anordnung (Abb. 1).

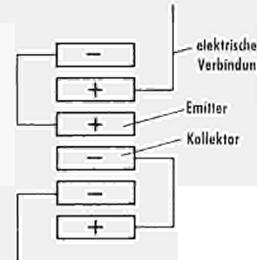


Abb. 2: Anordnung von Cäsium-Zellen mit ebener Geometrie

3. Anforderungen an die Zellenkomponenten

Der Physiker und der Konstrukteur, die an die Entwicklung und den Bau nuklearer Zellen herangehen, haben eine große Zahl allgemeiner Gesichtspunkte bei der Wahl der Materialien und der Abmessungen von Emitter, Kollektor und Isolator zu beachten, von denen die wichtigsten im folgenden angegeben werden.

a) Emitter

Der zylindrische Stift (Abb. 1), der als Emitter für Elektronen dient, kann entweder aus einem einheitlichen Material, einem Kernbrennstoff, bestehen, oder ein Kernbrennstoff ist von einer Hülle aus nicht spaltbarem Material umgeben. In diesem Falle sind die Funktionen der Wärmeerzeugung und Elektronenemission auf zwei verschiedene Materialien verteilt. An die Materialeigenschaften des Kernbrennstoffs und der Umhüllung werden folgende Forderungen gestellt:

1. eine bestimmte, durch die Theorie geforderte Austrittsarbeit für Elektronen (je nach den Betriebsbedingungen zwischen 2,5 und 3 eV);
2. hohe Wärmeleitfähigkeit des Kernbrennstoffs zur Vermeidung unzulässig hoher Temperaturen in der Achse des Stiftes (hohe thermische Wirkungsgrade lassen sich nur mit Wärmeflächen der Stiftoberfläche von der Größenordnung 100 W/cm² erreichen);
3. gute elektrische Leitfähigkeit des Kernbrennstoffs bei nicht umhüllten Stiftes (bei Metallen ist dies durch das Wiedemann-Franz'sche Gesetz bei einer guten Wärmeleitfähigkeit automatisch erfüllt), damit der Potentialabfall längs des Stiftes klein bleibt. Als Richtwert kann ein Spannungsabfall von 0,1 V bei einer Elektronenstromdichte von 10 A/cm² dienen;
4. hoher Schmelzpunkt;
5. eine kleine Verdampfungsgeschwindigkeit bei der Betriebstemperatur der Stiftoberfläche von etwa 1700 bis 2000 °C (bei einem Elektrodenabstand von 1 mm ist eine Verdampfungsgeschwindigkeit von 0,1 mm pro Jahr gerade noch tragbar);
6. chemische Resistenz gegen Cäsiumdampf;
7. möglichst kleiner Emissionskoeffizient für Wärmestrahlung;
8. hohe mechanische Festigkeit, insbesondere gegen thermische Schockbeanspruchung.

Diese Liste ließe sich weiter fortsetzen. Es sind z. B. noch die nuklearen Eigenschaften, die Strahlenschädigung und die Diffusion von Spaltproduk-

ten zu berücksichtigen [9]. Die große Zahl der Forderungen demonstriert die geringe Auswahl an brauchbaren Materialien und den Umfang der notwendigen Untersuchungen.

Auch die günstigsten Abmessungen des Emittier-Stiftes richten sich u. a. nach den Materialeigenschaften. Hinsichtlich der Wahl der Länge des Stiftes ist neben der elektrischen Leitfähigkeit zu beachten, daß infolge der Änderung des elektrischen Stroms in Richtung der Achse und der damit verbundenen Änderung des ringförmigen Magnetfeldes im Cäsium-Plasma ein magnetischer Druck in Richtung des freien Endes des Stiftes erzeugt wird [10]. Eine inhomogene Verteilung der Elektronen im Plasma mit verschlechterten Betriebsbedingungen ist die Folge. Dieser Effekt und die mechanische Festigkeit des Stiftes in Verbindung mit der Forderung nach möglichst kleiner Spaltbreite begrenzt die Länge des Stiftes auf einige Zentimeter.

b) Kollektor

Die Suche nach einem geeigneten Kollektormaterial ist weniger schwierig. Notwendige oder wünschenswerte Eigenschaften sind: korrosionsfest gegen Cäsiumdampf, gut wärmeleitend, gut verarbeitbar, gute Reflexion der Wärmestrahlung des Emittiers und geringe Neutronenabsorption. Neben Nickel ist Niob sehr gut geeignet, da Niob praktisch den gleichen Wärmeausdehnungskoeffizienten wie eine Al_2O_3 -Keramik besitzt.

c) Keramik-Halterung

Als Material für die elektrische Isolierung und gleichzeitige Halterung hat sich hochreines Al_2O_3 am besten bewährt. Technisch schwierig ist die Verlötlung der Keramikringe mit dem Metall des Kollektors. Die Metall-Keramik-Verbindungen müssen vakuumdicht bleiben unter der Einwirkung von Cäsiumdampf und schnellen Neutronen. Sie sollen weiterhin relativ hohe Temperaturen des Kollektors (bei Anwendungen in der Raumfahrt über $1000^\circ C$) und hohe mechanische Belastungen aushalten.

4. Bestrahlungsversuche in Reaktoren

Die Grundlage für die Entwicklung nuklearer Cäsium-Zellen bilden die Bestrahlungsexperimente in einem Forschungsreaktor. Diese Versuche benötigen eine sorgfältige Vorbereitung, zu denen auch die Versuche mit elektrischer Heizung außerhalb des Reaktors gehören; die nukleare Heizung wird hierbei durch ein Elektronenbombardement auf den Emittier simuliert. Eine große Zahl technologischer Probleme, die hier im einzelnen nicht diskutiert werden können, gilt es zu lösen, bevor eine Zelle in den Bestrahlungskanal gebracht werden kann.

Als Beispiel für ein Konstruktionsproblem soll die elektrische Isolierung von Emittier und Kollektor etwas näher behandelt werden. Im Bestrahlungskanal ist ein hoher Neutronenfluß notwendigerweise mit einer hohen γ -Strahlungsintensität verbunden, die zur Erwärmung aller Materialien, so auch der als Isolierung dienenden Keramikteile, führt. Zur Vermeidung überhörter Temperaturen, die eine Gefahr der Undichtigkeit bringen, muß die in der Keramik erzeugte Wärme abgeführt werden. Andererseits darf die Temperatur der Keramik nicht unter der des Cäsiumbads (250 bis $300^\circ C$) liegen, da sich sonst Cäsium an der Keramik kondensiert. Eine direkte Kühlung durch das Reaktor-Kühlwasser ist daher unzulässig.

Zu einem Bestrahlungsversuchsprogramm gehören auch die Untersuchungen in heißen Zellen nach der Bestrahlung zur Feststellung der mechanischen und chemischen Veränderungen in der Zelle und zur Bestimmung des Abbrandes des Kernbrennstoffs.

In vielen Laboratorien in den USA, in Europa und der UdSSR werden heute Versuche mit elektrisch geheizten Cäsium-Zellen durchgeführt, aber nur von wenigen Stellen sind bisher Bestrahlungstests bekannt geworden. Das hat nicht zuletzt seinen Grund in dem notwendigen Aufwand, der die Möglichkeiten eines normal ausgerüsteten Forschungslabors übersteigt und der dann sofort sichtbar wird, wenn der Schritt von der Planung zur Realisierung getan wird. Im folgenden wird versucht, einen kurzen Überblick über die bisherigen Versuche mit Einzelzellen zu geben, soweit sie dem Verfasser bekannt sind. Für Informationen über Einzelheiten muß auf die Literatur verwiesen werden. Versuche mit mehreren Zellen in Serie sind unseres Wissens noch nicht gemacht worden.

5. Versuche in den Los-Alamos-Laboratorien

Der erste unter Leitung von Grover in Los Alamos im April 1959 erfolgreiche Versuch [1] hatte nur die prinzipielle Möglichkeit der Realisierung einer nuklearen Zelle bewiesen. In den bisher etwa 60 weiteren Tests konnte die Lebenszeit der Zellen von anfänglich einigen Minuten bis zu einigen Monaten erhöht werden. Bis zum Juni 1961 wurden Vierteljahresberichte [11] veröffentlicht, die jeweils eine Zusammenfassung von (nicht zugänglichen) monatlichen Arbeitsberichten darstellen und mehr einen guten Eindruck von den zu überwindenden technologischen Schwierigkeiten geben, als daß sie wirkliche Informationen liefern. Die späteren Vierteljahresberichte sind »classified«.

Die Grundlage der Zellenentwicklung von Los Alamos bildet ein dort erstmals (später auch bei General Atomics) entwickelter zylindrischer Brennstoffstift aus einer Mischung von Uranmonokarbid und Zirkonkarbid [12], dessen Abmessungen in Abb. 3 angegeben sind. Das Uran ist zu 97% angereichert, der Stift also praktisch »schwarz« für Neutronenstrahlen.

Urankarbid besitzt eine Austrittsarbeit für Elektronen von etwas über 3 eV, die recht gut den geforderten optimalen Wert entspricht. Infolge seines relativ niedrigen Schmelzpunktes ($2450^\circ C$) ist aber seine mechanische Festigkeit bei $1800^\circ C$ (das ist die notwendige Emittiertemperatur zur Emission von etwa 10 A/cm²) unzureichend; das Material wird plastisch. Die Zumischung von Zirkonkarbid verbessert zwar wegen dessen hohem Schmelzpunkt ($3500^\circ C$) die mechanischen Eigenschaften in ausreichendem Maße, jedoch beträgt für eine Mischung aus UC und ZrC die auf eine Richardson-Konstante 120 A cm⁻² grad⁻² bezogene Austrittsarbeit etwa $3,5$ eV [13]. Der spezifische elektrische Widerstand wird im Temperaturbereich von 80 bis $2100^\circ C$ zu $(158 + 0,108 T/^\circ K) \cdot 10^{-6} \Omega$ cm angegeben [11], woraus sich bei den Stiftabmessungen der Abb. 3 und einer Stromdichte von 10 A/cm² an der Stiftoberfläche ein Spannungsabfall von $0,085$ V längs des Stiftes errechnet. Mit der angegebenen Wärmeleitfähigkeit von $0,04$ cal cm⁻¹ grad⁻¹ sec⁻¹ zwischen 1500 und $1800^\circ C$ ist die Temperaturüberhöhung in der Achse des Stiftes etwa 100 grad bei einem Wärmefluß an der Oberfläche von 100 W/cm².

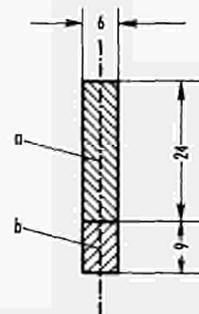


Abb. 3: Abmessungen in mm eines Brennstoffstiftes aus UC-ZrC (von General Atomics hergestellt), a) hochangereicherter, b) nicht angereicherter Teil

Das thermische Emissionsvermögen hängt stark von der Beschaffenheit der Oberfläche ab. Der angegebene Wert $0,5$ scheint etwas zu niedrig im Vergleich zu anderen Werten in der Literatur. Jedenfalls liegt er höher als bei den hochschmelzenden Metallen ($0,25$ bis $0,35$).

Für die Bestrahlungstests stand der Omega-West-Reaktor zur Verfügung, der eine maximale Leistung von 5 MW hat und dessen Kühlwasser gleichzeitig zur Kühlung der Cäsium-Zellen dient. Zwischen 3 und $3,3$ MW (das ist von Experiment zu Experiment verschieden wegen der sonstigen Neutronenabsorption im Reaktor) erreichte die Oberfläche der Brennstoffstifte eine ausreichende Temperatur zur Emission von etwa 10 A/cm² Elektronenstrom. Aus der Analyse nach der Bestrahlung konnte aus der Zahl der gespaltenen Uranatome unter diesen Bedingungen ein thermischer Neutronenfluß an der Stiftoberfläche von etwa $2 \cdot 10^{13}$ cm⁻² sec⁻¹ errechnet werden. Den Prinzip-Aufbau einer typischen Testzelle (Standard-Zelle) zeigt Abb. 4. Der mit Helium und Al_2O_3 -Pulver gefüllte Wärmespalt hält die Keramik und die Außenseite des Kollektors oberhalb $300^\circ C$. Abb. 5 zeigt eine Strom-Spannungs-Charakteristik und die Nutzleistung einer solchen Zelle bei einer Reaktorleistung von $3,2$ MW. In Abb. 6 sind der thermische Wirkungsgrad und die Emittiertemperatur über der Reaktorleistung als Ergebnis von Rechnungen aus einigen zur Verfügung gestellten Meßdaten [14] dargestellt. Der Rückgang des Wirkungsgrades oberhalb 4 MW Reaktorleistung ist durch die Begrenzung der Elektronenstromdichte durch den inneren Widerstand der Zelle auf etwa 20 A/cm² begründet. Die Emittiertemperatur (im Betriebszustand, Kurve a) erhöht sich bei Ausfall der Peltier-Kühlung durch Unterbrechung des Stromkreises oder starkes Absinken des Cäsiumdruckes auf Kurve b (Leerlauf).

Bei einer Emittiertemperatur oberhalb etwa $2100^\circ C$ wird die Verdampfung des UC-ZrC zu groß, obwohl sie sich in Cäsiumdampf auf etwa den dreißigsten Teil gegenüber Vakuum reduziert [14], so daß der Emittier stark angegriffen wird. Dauertests sind nur bei Emittiertemperaturen wenig über $2000^\circ C$ durchgeführt worden. Der erzielte thermische Wirkungsgrad betrug etwa 7% bei einer Lebensdauer von etwa 1000 h [14]. Ganz allgemein ist zu bemerken, daß der Erfolg eines Tests durch Wirkungsgrad und Lebensdauer gekennzeichnet werden muß.

6. Versuche in Industrielaboratorien der USA

Über Bestrahlungstests mit Cäsium-Zellen ist weiterhin aus den John-Jay-Hopkins-Laboratorien der General Atomics in San Diego (Kalifornien) und aus dem Atomic Laboratory der General Electric Co. in Vallecitos (Kalifornien) berichtet worden.

Die in San Diego mit $(\text{UC})_{0,9}(\text{ZrC})_{0,1}$ -Stiften durchgeführten Versuche [15] waren dadurch behindert, daß der zur Verfügung stehende TRIGA-Reaktor nur kurzzeitig auf 1 MW gebracht werden konnte, um den nötigen Neu-

tronenfluß zu liefern. Bei einer Emittertemperatur von etwa 1900 °C wurde ein thermischer Wirkungsgrad von 7% bestimmt [16], was mit den Ergebnissen von Los Alamos etwa in Einklang steht. In Zukunft wird ein Reaktor mit ausreichendem Neutronenfluß zur Verfügung stehen, um auch Dauertests durchzuführen.

General Electric befand sich in der glücklicheren Lage, in ihrem Ge-Test-Reaktor über einen ausreichenden Neutronenfluß zu verfügen. Die zunächst auch mit $(\text{UC})_{0,3}(\text{ZrC})_{0,7}$ -Stiften gemachten Tests waren zur Orientierung und Einarbeitung in die Probleme bestimmt.

Nach diesen Versuchen ist erstmals ein Test mit einer Scheibe aus hochangereicherem UO_2 mit einer Mo-Hülle durchgeführt und veröffentlicht worden [17]. Abb. 7 zeigt den mittleren Teil der Zelle mit der Halterung

Abb. 4 oben: Standard-Testzelle von Los Alamos (Prinzipskizze)

Abb. 5 Mitte: Strom-Spannungs-Charakteristik und elektrische Leistung einer Test-Zelle von Los Alamos (emittierende Oberfläche des Stiffs: 4,7 cm²) nach [14]

Abb. 6 unten: Thermischer Wirkungsgrad und Emittertemperaturen bei maximaler Leistung (a) und offenem Stromkreis (b) nach [14]; Extrapolation unter Annahme konstanter Stromdichte von 20 A/cm²

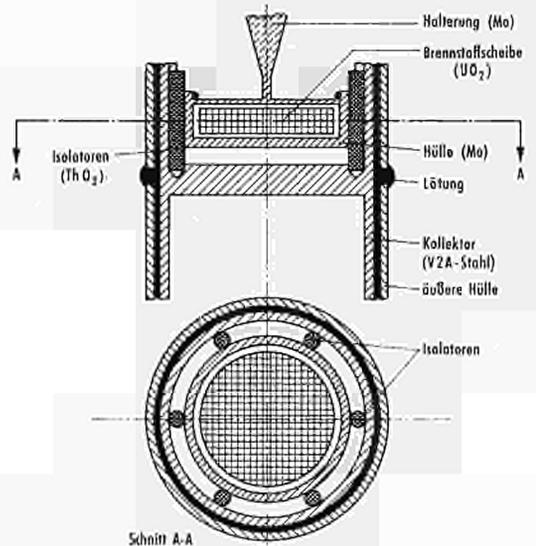
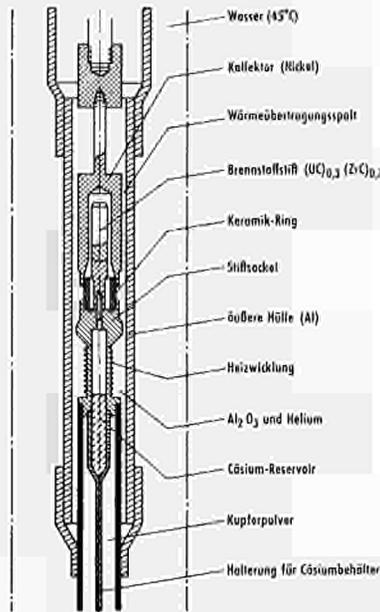
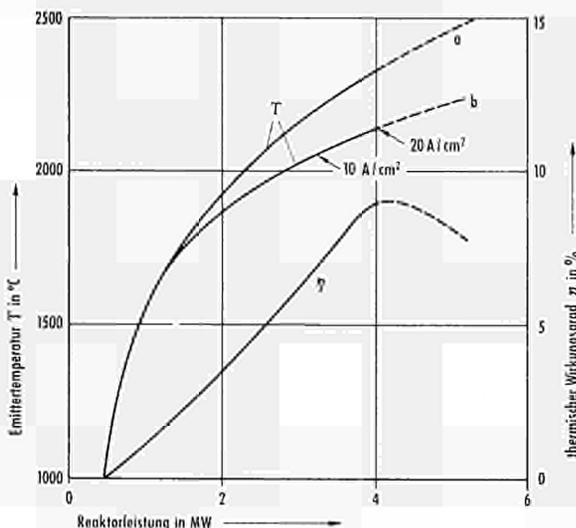
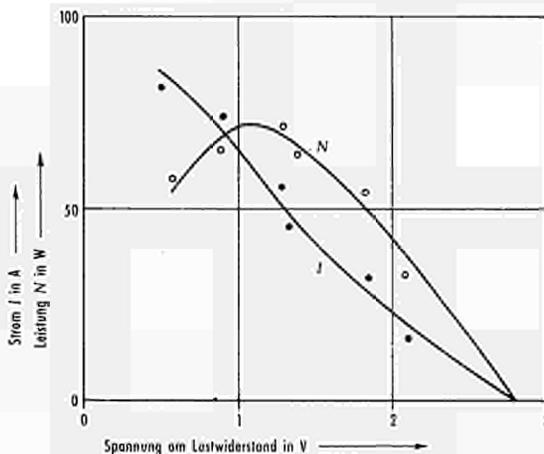


Abb. 7: Zum Bestrahlungstest der General Electric Co. mit UO_2 -Emitter. Mittlerer Teil der Zelle, Halterung und Justierung des Brennstoff-Elements



der Emitter-Scheibe. Der Versuch endete nach einer Bestrahlungszeit von 63 h mit einem Kurzschluß durch Bedampfung der sechs als Abstützung dienenden Isolatoren aus Thoriumoxyd mit dem Emitter-Material.

Es ist anzunehmen, daß in nächster Zukunft weitere Firmen in den USA mit Bestrahlungen von Cäsium-Zellen beginnen werden. Neben der AEC ist die US Navy an einer Entwicklung von nuklearen Thermionic-Konvertern interessiert (wahrscheinlich für Zwecke der U-Boot-Antriebe) und stellt den Firmen Mittel zur Verfügung.

Die in den General-Motors-Forschungslaboratorien seit 1959 gemachten Bestrahlungsversuche mit edelgasgefüllten Dioden sollten prüfen, ob eine genügende Ionisierung des Gases durch Spaltbruchstücke erreicht werden kann [18]. Einen nach diesem Prinzip arbeitenden Thermionic-Konverter mit technisch interessanten Leistungsdichten zu entwickeln, ist aber nach nicht gelungen [8].

7. Versuche in den Laboratorien von Harwell und Ispra

Über den ersten Bestrahlungsversuch von Cäsium-Zellen in Europa wurde Mitte 1962 aus Harwell (England) berichtet [19]. Die umfangreichen Arbeiten sind eingehend in den Harwell-Berichten [20—25] beschrieben.

Der Versuch wurde in dem mit D_2O gekühlten PLUTO-Reaktor mit selbst hergestellten $(\text{UC})_{0,45}(\text{ZrC})_{0,55}$ -Brennstoffstiften (Durchmesser 1 cm) durchgeführt. Abb. 8 zeigt die verwendete Zellenkonstruktion im Prinzip. Um das Problem der Metall-Keramik-Verbindung zu umgehen, ist als elektrischer Lastwiderstand ein Teil des Zellenkörpers selbst benutzt worden. Gegenüber den bisher beschriebenen Experimenten mit einem Cäsiumdruck von etwa 1 Torr (Hochdruck-Zelle) ist in Harwell der Cäsiumdruck unterhalb 0,01 Torr gehalten worden (Niederdruck-Zelle), so daß ein Elektrodenabstand von 0,5 cm erlaubt war. Weitere Versuche mit einem veränderlichen Lastwiderstand außerhalb der Zelle sind in Vorbereitung.

Im Euratom-Kernforschungszentrum Ispra sind vorbereitende Versuche und Konstruktionsstudien für nukleare Cäsium-Zellen gemacht worden. Eine Konstruktionsstudie zeigt Abb. 10.

Die Außenseite von Kollektor und Keramik-Ring kann mit einem organischen Kühlmittel (Diisopropylbiphenyl) zwischen 200 und 300 °C gehalten werden, die Innenseite stellt sich entsprechend dem Wärmefluß auf höhere Temperaturen ein. Die schraubenförmige Führung des Kühlmittels gibt genügend große Temperaturanstiege zur Messung des Wärmeflusses vom Kollektor. Ein zweiter organischer Kreislauf für das Cäsium-Reservoir gestattet eine optimale Einstellung des Cäsiumdrucks.

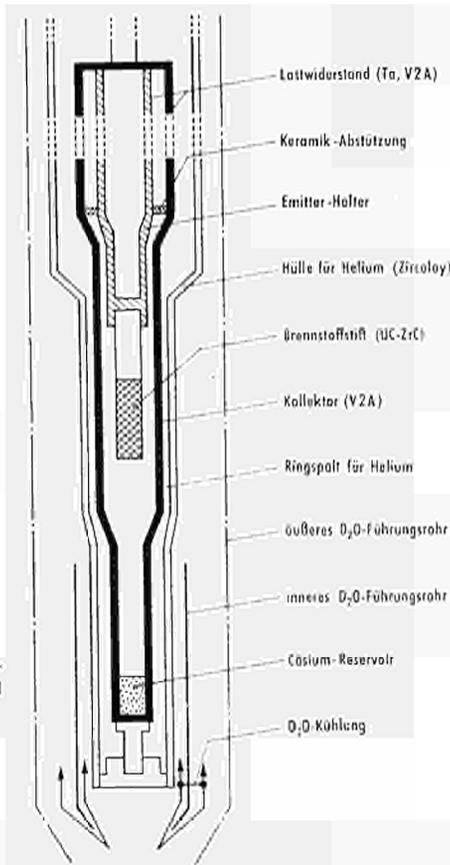


Abb. 8: Prinzipskizze der Testzelle von Harwell (England)

Vom Standpunkt der Kontrolle der Temperatur von Kollektor und Keramik ist die Zelle der Abb. 9 eine sehr sichere Lösung. Allerdings ist damit ein relativ großer Aufwand bei der Installierung des Kühlsystems im Reaktor verbunden. Eine andere Lösung wurde gefunden, bei der kaltes entsalztes Wasser verwendet werden kann. Die Kollektor- und Keramikttemperatur wird hierbei durch besondere eingebaute Wärmewiderstände stets über der Cäsiumtemperatur gehalten.

Die erste Versuchs-Zelle wird mit einem UC-ZrC-Brennstoffstift von General Atomics bestückt sein und soll in Kürze getestet werden. Es steht ein vertikaler Strahlungskanal des Reaktors Ispra 1 zur Verfügung, der einen thermischen Neutronenfluß von $6 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$ bei der vollen Leistung von 5 MW hat.

8. Thermischer Wirkungsgrad und Lebensdauer

Das bisherige Ergebnis der Versuche in Los Alamos ist eine nukleare Zelle mit einem thermischen Wirkungsgrad von maximal etwa 9% (Abb. 6), und etwa 7% bei einer Lebensdauer von rund 1000 h. Wie kommt es, daß der thermische Wirkungsgrad so niedrig ist, hat man doch mit elektrisch geheizten Zellen doppelt so hohe Werte im Dauerversuch gemessen?

Um diese Frage zu beantworten, vergleichen wir in Tab. 1 die Daten einer Testzelle von Los Alamos mit den Daten einer optimierten elektrisch geheizten Zelle, deren

Tab. 1: Vergleich der Daten zweier Zellen

Zelle	Emittier-temperatur °C	Elektronenstromdichte A/cm^2	Effektive Austrittsarbeit eV	Elektroden-Abstand mm	Thermisches Emissionsvermögen	Thermischer Wirkungsgrad %
elektrisch geheizt mit Re-Emittier	1680	10	2,95	0,1	0,15—0,25	15
nukleare Zelle Los Alamos	2050	10	3,6	1	0,5—0,8	7

Kathode aus Rhenium besteht (Fig. 7 (b) in [26]). Die Optimierung ist hier, im Gegensatz zu den üblichen auf meist nicht realisierbaren idealen Annahmen fußenden Rechnungen, auf Grund von Messungen an Zellen im Dauertest gewonnen worden. Sie sind also realisierbar. Das Beispiel ist so gewählt, daß die Elektronenstromdichte in beiden Fällen gleich ist und etwa der durch den Innenwiderstand bedingten oberen Grenze entspricht.

Die effektive Austrittsarbeit ist eine aus der Richardson-Formel und dem Emissionsstrom gewonnene Rechengröße. Sie erklärt sich beim Rhenium, das in Vakuum eine Austrittsarbeit über 5 eV hat, aus dem von Langmuir und Taylor untersuchten Effekt der Emissionsbegünstigung durch Bedeckung von Metalloberflächen mit monomolekularen Cäsiumschichten. Bei einem UC-ZrC-Emittier ist dieser Effekt sehr gering. Aus Tab. 1 lassen sich als Ursachen für den geringen thermischen Wirkungsgrad der Los-Alamos-Zelle die zu hohe effektive Austrittsarbeit des UC-ZrC, der relativ große Elektrodenabstand und das hohe thermische Emissionsvermögen erkennen.

Der relativ große Elektrodenabstand von 1 mm kann bei Verwendung von keramischen Kernbrennstoffen nur wenig verringert werden ohne starke Herabsetzung der Lebensdauer der Zelle durch die Gefahr eines elektrischen Kurzschlusses bei geometrischen Veränderungen infolge Kernstrahlung. Das thermische Emissionsvermögen hängt stark von der Oberflächenbeschaffenheit des Emittiers und des als Reflektor dienenden Kollektors ab. Die relativ hohe Verdampfungsgeschwindigkeit der UC-ZrC-Emittier macht nach kurzer Zeit jeden polierten Kollektor »schwarz« gegenüber der Strahlung. Es sind seit einiger Zeit in Los Alamos Versuche im Gange, die Strahlungsverluste durch eine große Zahl zwischen Emittier und Kollektor gebrachter Wärmeschirme zu verringern [12], ohne daß bisher ein Erfolg gemeldet worden ist. Am stärksten wirkt sich die zu hohe Austrittsarbeit des UC-ZrC aus, die eine hohe Betriebstemperatur des Emittiers erfordert. Eine Erhöhung von 1680°C auf 2050°C in unserem Beispiel verdoppelt fast die Strahlungsverluste bei gleichem Emissionsvermögen. Man sollte vor allem nach einem Emittier mit einer effektiven Austrittsarbeit von etwa 3 eV suchen.

Nicht nur der thermische Wirkungsgrad, sondern auch die Lebensdauer der Zelle wird durch die Eigenschaften des UC-ZrC begrenzt. Obwohl genaue Untersuchungsberichte noch

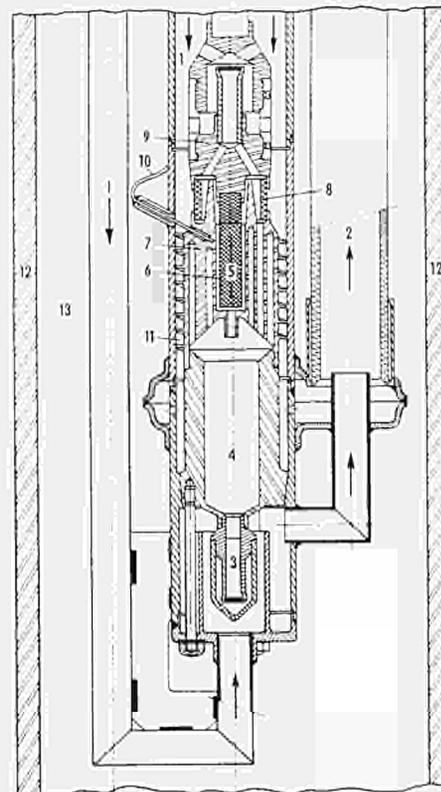


Abb. 9: Konstruktionsstudie einer Testzelle (Ispra). 1 Eintritt der organischen Kühlflüssigkeit, 2 Austritt, 3 Cäsium-Reservoir, 4 Ausdehnungsgefäß, 5 Emittier (UC-ZrC), 6 Spalt mit Cs-Plasma, 7 Kollektor (Nb), 8 Keramik (Al_2O_3), 9 Sokkel (Nb), 10 Thermoelement, 11 Kühlmittelführung, 12 Einsatzbehälter (Al), 13 Helium

nicht vorliegen, kann man mit großer Wahrscheinlichkeit annehmen, daß die bei der Spaltung sich bildenden Gase die Hauptursache für die Deformation des Brennstoffs sind. Wahrscheinlich bilden sich bei den hohen Temperaturen im Gitter des UC-ZrC kleine Höhlen, in denen sich die Gasatome sammeln, bis der Druck des Gases das Gitter sprengt.

9. Neue Emittier-Materialien

Die Suche nach einem Kernbrennstoff, der *nicht umhüllt* als Emittier eine Austrittsarbeit von etwa 3 eV besitzt und außerdem alle weiteren in Abschnitt 3 aufgezählten Eigenschaften hat, scheint ziemlich hoffnungslos zu sein. Eine intensive Forschung über Karbide bei General Atomics hatte das Resultat, daß es keine bessere Beimischung zum UC gibt als ZrC [27]. Die Oxyde haben im allgemeinen zu hohe Dampfdrücke. Nur die Boride weisen genügend hohe Schmelzpunkte und Austrittsarbeiten um und unter 3 eV auf [28]. Wegen ihrer sehr hohen Neutronenabsorption kommt ihre Verwendung in einem thermischen Reaktor aber nicht in Frage.

Anscheinend ist nur auf dem Wege über *umhüllte* Brennstoffelemente eine Verbesserung des Wirkungsgrades und der Lebensdauer zu erwarten. Die Hülle kann im Prinzip aus Hochtemperatur-Materialien wie Nb, W, Ta, Mo und Re bestehen. Diese finden in den elektrisch geheizten Zellen fast ausschließlich Verwendung und sind bereits genau untersucht worden [29]. Damit gelten hinsichtlich des thermischen Wirkungsgrads die gleichen Überlegungen, die an anderer Stelle dieses Heftes bereits für die elektrisch geheizten Zellen angestellt sind. Auf Grund des Langmuir-Taylor-Effekts kann die Austrittsarbeit durch bestimmte Wahl des Cäsiumdampfdruckes und der Emittier-temperatur theoretisch auf jeden Wert eingestellt werden, also auch beispielsweise auf 3 eV. Praktisch sind dem allerdings Grenzen gesetzt.

Die Verwendung von hochschmelzenden Metallen als Emittier verringert das thermische Strahlungsvermögen und läßt wahrscheinlich auch durch größere mechanische Stabilität des Stiffes geringere Elektrodenabstände zu. Bei umhüllten Brennstoffelementen tritt jedoch als neues Problem die Verträglichkeit des Hüllenmaterials mit dem Kernbrennstoff auf. Bei sehr hohen Temperaturen diffundieren auch feste Stoffe mehr oder weniger durcheinander, ändern die chemische Zusammensetzung des ursprünglichen Materials in der Diffusionszone und führen oft zur Zerstörung des Gefüges. Bei Verwendung von Uranmonokarbid als Kernbrennstoff bildet sich leicht durch Reaktion mit den Metallen flüssiges metallisches Uran, das längs der Korngrenzen wandert. Oberhalb 1800°C widersteht von W, Ta und Mo nur Wolfram als Hüllenmaterial von Urankarbid diesem Angriff [30].

Läßt sich durch die Umhüllung das Problem der Verbesserung des Wirkungsgrades angehen, so bleibt bei Verwendung von Urankarbid als Kernbrennstoff das Problem der Lebensdauer bestehen. An vielen Stellen denkt man daran, anstelle von Urankarbid die Uranoxyde zu verwenden, denen man größere Löslichkeit für die Spaltgase zuschreibt. Da ihre Wärmeleitfähigkeit aber zu gering ist, muß man Metalle beimischen. Damit kommt man zu den Cermets. Diese sind hinsichtlich ihrer Verwendbarkeit in Thermionic-Konvertern bereits etwas untersucht worden [31].

10. Zellen mit hoher Kollektortemperatur und Zellengruppen in Serie

In allen bisher durchgeführten Bestrahlungsexperimenten lagen die Kollektortemperaturen an der dem Emittier zugewandten Seite nicht höher als etwa 600°C. Diese Beschränkung ist hauptsächlich durch die verfügbaren Metall-

Keramik-Verbindungen und das Kühlsystem gegeben. Für die Raumfahrt sind Kollektortemperaturen an der Außenseite von 1000°C und mehr sehr wichtig, um die Radiatoren möglichst leicht zu machen. Um Zellen bei sehr hohen Kollektortemperaturen zu betreiben, muß einmal das Problem der Metall-Keramik-Verbindungen bei 1000°C und zum anderen das Kühlproblem gelöst werden. Die Installierung eines Flüssigmetall-Kreislaufs in einem Reaktorbestrahlungskanal ist kostspielig wegen der Sicherheitsprobleme. Vielleicht ist der Einbau geeigneter Wärmewiderstände zusammen mit einem Kreislauf mit Wasser oder organischer Flüssigkeit die einfachere Lösung.

Die hohen Kollektortemperaturen werfen auch rein physikalische Probleme auf, die damit zusammenhängen, daß der Kollektor selbst Elektronen emittiert. Studien in dieser Hinsicht mit elektrisch geheizten Zellen sind bereits durchgeführt worden [6].

Die Verwendung von organischen Flüssigkeiten als Kühlmittel gestattet relativ einfach, einige Zellengruppen in Serie geschaltet zu testen, da eine elektrische Isolierung zwischen den Kollektoren und der Kühlfüssigkeit nicht notwendig ist. Eine Kühlung mit Flüssigmetall wirft das Problem einer bereits in Abschnitt 2 angedeuteten elektrischen Isolierschicht auf. Diese Isolierschicht soll Wärmeflüsse von etwa 50 W/cm² bei möglichst kleinem Temperaturabfall (kleiner als etwa 50 grd) erlauben, was einen sehr guten, mechanisch stabilen Wärmekontakt mit dem Kollektor und einer äußeren Metallhülle erfordert. Sie soll andererseits aber auch bei Serienschaltung sehr vieler Zellen hohe Spannungen isolieren, d. h., die Feldstärken dürfen nicht die kritische Größe für Durchschläge (etwa 100 kV/cm) erreichen.

11. Der Thermionic-Reaktor als Fernziel

Im jetzigen Stadium der Entwicklung von nuklearen Cäsium-Zellen scheint es verfrüht, sich ernsthaft mit der Konzipierung eines vollständigen Reaktorprojekts mit Cäsium-Zellen zu befassen. Andererseits wäre es verfehlt, die Augen nur auf die Zelle und die Zellengruppe zu richten ohne eine Orientierung auf die spätere Anwendung. Der Thermionic-Reaktor ist das Fernziel, auf das eine Zellenentwicklung hinarbeiten muß. Hierbei ist von Bedeutung, welche technische Funktion der spätere Reaktor ausüben soll. Nach unserer heutigen Kenntnis läßt die Beschränkung des thermischen Wirkungsgrades auf maximal etwa 15% nur zwei Anwendungen interessant erscheinen: 1. als Kompaktreaktor für die Raumfahrt, 2. als Vorschaltstufe für ein konventionelles Kernkraftwerk zur kommerziellen Elektrizitätserzeugung. Die Anforderungen an die Eigenschaften der Zellen sind bei beiden Anwendungen sehr verschieden. Daher seien beide Anwendungsmöglichkeiten kurz gestreift.

12. Der Raumfahrtreaktor

Für die interplanetare Raumfahrt sind die elektrischen Antriebe (Plasma, Ionen) von Bedeutung. Als Energiequelle dieser Antriebe kommt praktisch nur ein Kernreaktor in Frage. Die Umwandlung der Kernspaltungswärme in elektrische Energie wird mit Quecksilberdampf-Turbinen versucht (SNAP-2, SNAP-8) [32], doch ist es zweifelhaft, ob die von der NASA geforderte Betriebsdauer von 10000 h erreichbar ist. Das SNAP-2-Programm ist beendet und der Reaktor (mit einer thermischen Leistung von 50 kW) inzwischen zerlegt [33]. Über die Betriebserfahrungen mit der Turbine ist offiziell nichts bekannt. Ein neues Programm SNAP-50 mit einem lithiumgekühlten schnellen Reaktor für eine thermische Leistung von 300 kW bis 1 MW ist in Arbeit. Der Reaktor soll bereits 1965 betriebsfähig sein.

Ein entscheidender Vorteil eines Thermionic-Reaktors gegenüber Projekten mit Turbinen ist die Gewichtsersparnis durch den praktischen Fortfall großflächiger Radiatoren. Man hofft spezifische Leistungen von etwa 1 kW/kg (gegenüber etwa 0,2 kW/kg mit Turbinen) zu erreichen. Da man in naher Zukunft nur an relativ kleinen Einheiten von einigen 100 kW bis 1 MW elektrischer Leistung interessiert ist, stellt sich das Problem, ob ein schneller oder ein thermischer Reaktor zu dem kleinsten Gesamtgewicht führt. An verschiedenen Stellen durchgeführte Rechnungen zur kritischen Masse sind nicht zugänglich. Die Entscheidung, ob schnell oder thermisch, wird große Konsequenzen für das Bestrahlungsprogramm der Zellen haben.

Obwohl die Chancen des Thermionic-Reaktors auch von NASA-Stellen günstig beurteilt werden [34], scheint man bei der AEC und der NASA noch zu zögern, jetzt schon größere Programme zur Reaktorentwicklung zu beginnen. Die teilweise von der Industrie der USA gemachten Vorschläge, ein solches Programm bis 1970 durchzuführen [35], sind, soweit sie die Konzeption mit nuklearen Zellen betreffen, als zu optimistisch zu bezeichnen.

13. Kommerzielle Elektrizitätserzeugung

Es ist evident, daß eine Vorschaltstufe mit Thermionic-Konvertern für ein konventionelles Kernkraftwerk nur sinnvoll ist, wenn die Investitionskosten nicht zu hoch liegen. Berechnungen hierüber haben zum gegenwärtigen Zeitpunkt u. a. deshalb wenig Erfolg, weil niemand sagen kann, welche Materialien notwendig sein werden und wie hoch der Preis dieser Materialien (z. B. Niob) bei Bedarf von großen Mengen sein wird.

Eine weitere völlig offene Frage ist die Betriebssicherheit. Es scheint, daß die Wärmeleistung einer Zelle etwa 1 kW betragen wird. Die Zahl der Zellen in einem 100-MW-Kraftwerk ist also enorm groß.

Ist bei einem Raumfahrtreaktor der thermische Wirkungsgrad nicht so sehr von Bedeutung, so spielt er bei dem kommerziellen Kraftwerk die entscheidende Rolle. Eine bisher in diesem Bericht noch nicht erwähnte Möglichkeit zur Erhöhung des Wirkungsgrades ist die Ausnutzung des Langmuir-Taylor-Effekts zur Herabsetzung der Austrittsarbeit des Kollektors unter die des Cäsiums (1,9 eV). Die Entwicklung von Kollektoren mit niedriger Austrittsarbeit ist eine spezifische Aufgabe für die Zwecke der kommerziellen Elektrizitätserzeugung.

Es ist auch verschiedentlich in der Literatur der Vorschlag gemacht worden, mit einer Thermionic-Vorschaltstufe eine zweite Stufe mit thermoelektrischen Konvertern innerhalb des Reaktors zu kombinieren [36]. Jedoch bestehen hier viele prinzipielle Schwierigkeiten: 1. Während die Thermionic-Konverter hohe thermische Leistungsdichten von 100 W/cm² erfordert, sind die Materialien der thermoelektrischen Konverter bisher nur für um eine Größenordnung geringere Wärmeflüsse geeignet. 2. Der relativ große Raumbedarf der Konverter verschlechtert die Neutronenökonomie. 3. Noch gibt es keine Materialien, die genügend strahlungsfest sind und trotzdem eine hohe Gütezahl besitzen.

Es ist die Ansicht des Verfassers, daß man vorerst als Fernziel den Raumfahrtreaktor ins Auge fassen sollte mit einem Seitenblick auf die speziellen Erfordernisse für die kommerzielle Elektrizitätserzeugung. Nach einigen Jahren Grundlagenforschung wird man die Chancen einer kommerziellen Anwendung besser beurteilen können.

Das Nahziel ist die nukleare Cäsium-Zelle. Hier wartet noch eine schöne, die enge Zusammenarbeit von Physikern, Ingenieuren, Metallurgen und Hochtemperatur-Technologen erfordernde und fördernde Aufgabe.

(Eingegangen am 18. 6. 1963)

Nachtrag

Seit der Niederschrift dieser Übersicht im März dieses Jahres sind weitere Experimente mit nuklearen Cäsium-Zellen unternommen worden.

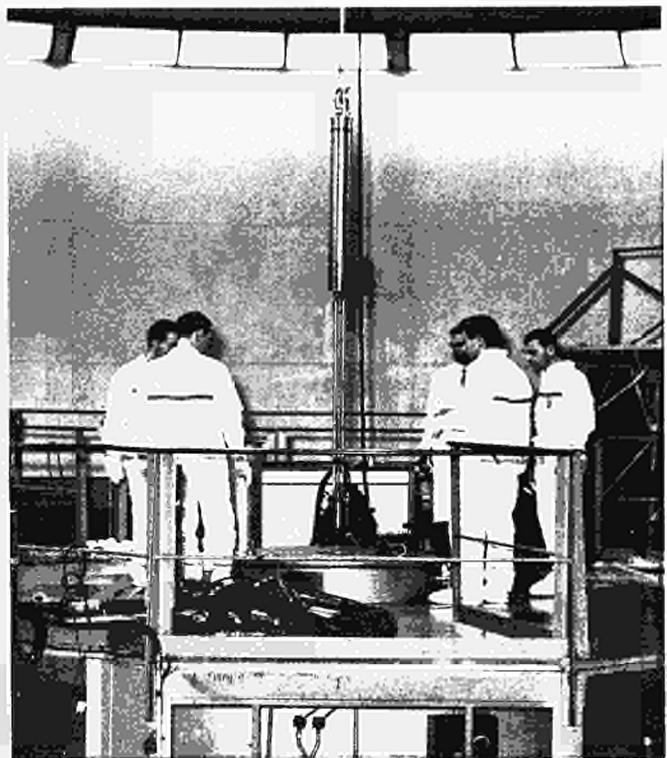


Abb. 10: Bestrahlungsexperiment in Ispra. Der an drei Kühlwasserrohren hängende Thermionic-Konverter wird in den Zentralkanal des Reaktors Ispra 1 eingeführt.

In Harwell konnten zwei weitere Bestrahlungsversuche mit Zellen ähnlicher Konstruktion, wie sie in Abschnitt 7 beschrieben ist, jedoch mit Lastwiderständen außerhalb der Zelle, erfolgreich durchgeführt werden.

Aus den USA wird von einem Versuch über 300 h mit Urandioxyd, das von Molybdän umhüllt war, berichtet [37]. Die Zelle lieferte 150 W während 250 h bei einem berechneten thermischen Wirkungsgrad von 8,5%. Dieser Versuch ist das Ergebnis einer vierjährigen Entwicklung der RCA in Zusammenarbeit mit der Babcock & Wilcox Co.

Der in Abschnitt 7 angekündigte Bestrahlungsversuch in Ispra konnte inzwischen mit Erfolg durchgeführt werden (Abb. 10). Ein neuartiges System, bei dem der Emittor durch Wärmestrahlung von einem UC-ZrC-Stift geheizt wird, arbeitete einwandfrei. Die vorgesehene Maximaltemperatur des Emittors von 2100 °C wurde bei einer Reaktorleistung von 1 MW erreicht.

Literatur

- [1] Grover, G. M.: *Nucleonics* **17**, Nr. 7, 54 (1959).
- [2] Salmi, E. W.: *Plasma Thermionic Converters 14th Annual Proceedings, Power Sources Conference, Mai 1960*.
- [3] Beller, W.: *Missiles and Rockets* **11**, Nr. 8, 26 (1962).
- [4] Howard, R. C.: *Nucl. Sci. and Eng.* **10**, 173 (1961).
- [5] Höcker, K. H., u. a.: *Raketentechnik und Raumfahrtforschung* Heft 1, 1 (1963).
- [6] Rasor, N. S., und C. C. Weeks: *Thermionic Converters for Compact Nuclear Power Plants*, NAA-SR-7144 (1962).
- [7] Blass, W.: *Z. angew. Physik* **14**, 1 (1962).
- [8] General Motors Corporation: *Investigations on the Direct Conversion of Nuclear Fission Energy to Electrical Energy in Plasma Diode*, US Dep. of Comm. Off. of Techn. Services, AD-250673 (1960).
- [9] Yang, L., und F. D. Carpenter: *J. Electrochem. Soc.* **108**, 1079 (1961).
- [10] Schock, A.: *J. Appl. Phys.* **31**, 1978 (1960).
- [11] Glassione, S. (Ed.): *Los Alamos Quarterly Status Reports of the LASL Plasma Thermocouple Development Program*, LAMS-2333, 2364, 2396, 2423, 2447, 2473, 2504, 2544, 2598.
- [12] Pidd, R. W., G. M. Grover, u. a.: *J. Appl. Phys.* **30**, 1575 (1959).
- [13] Danforth, W. E., und J. Williams: *J. Appl. Phys.* **32**, 1181 (1961).
- [14] Salmi, E. W.: *Private Mitteilung*.
- [15] General Atomics: *Electronics* **33**, Nr. 49, 78 (1960).
- [16] Howard, R. C. u. a.: *A Nuclear-Thermionic Fuel Element Test. Energy Conversion for Space Power*, Vol. 3, London—New York: Academic Press 1961, S. 211.
- [17] Ogle, H. M., u. a.: *Advances Energy Conversion* **2**, 353 (1962).
- [18] Jablonsky, F. E., u. a.: *J. Appl. Phys.* **30**, 2017 (1959).
- [19] Dunn, P. D., u. a.: *Nature* **195**, 65 (1962).
- [20] Walt, D. A., und C. Rice: *An Intermediate In-pile Diode Experiment*, AERE-R-4109 (1962).

- [21] Hill, R. J.: The Theoretical and Experimental Temperature Distribution in a Fuel Pin of a Thermionic Converter. AERE-R-4075 (1962).
- [22] Hill, R. J.: Material Problems Associated with a Cathode of an In-pile Thermionic Converter. AERE-R-4117 (1962).
- [23] Thorpe, T.: Uranium Carbide-Zirconium Carbide for Cathodes in Thermionic Diodes. AERE-R-4161 (1962).
- [24] Sanders, L. G.: An Estimate of the Neutron Flux Depression and Nuclear Heating in the Cathode of a Plasma Diode Fuel Element. AERE-N-1011 (1962).
- [25] Bainton, K. F.: Thermionic Properties of UC, UC-ZrC and Ta. AERE-R-4011 (1962).
- [26] Kitrilakis, S., and E. N. Hatsopoulos: Advances Energy Conversion 2, 583 (1962).
- [27] Yang, L., u. a.: Some Physics-Chemical Criteria for the Selection of Carbides as Cathodes in Cesium Thermionic Converters. General Atomic Report GA-2488 (1961).
- [28] Stephas, P.: Nucleonics 19, Nr. 12, 66 (1961).
- [29] Goddman, P., and H. Hamanoff: Study of Materials for Thermionic Converters. U.S. Dep. of Comm. Off. of Techn. Services. AD-273533 (1961)
- [30] Yang, L., and A. Weinberg: Interdiffusion between Uranium-Bearing Reactor Fuels and Refractory-Metal Thermionic Emitters. General Atomic Report GA-3124 (1962).
- [31] Preparation and Properties of UO₂ Cermet Fuels. Battelle Report BMI-1487 (1962).
- [32] Wetch, J. R., u. a.: The Practical Applications of Space Nuclear Power in the 1960's. TID-6312 (1961).
- [33] Beall, J. P., and M. W. Hulin: The Final Report on the SNAP-2 Experimental Reactor Operation and Test Program. NAA-SR-7088 (1962).
- [34] Bernatowicz, D. T.: ARS-Journ. Aug. 1962, 1256 (1962).
- [35] Nucleonics 20, Nr. 12, 20 (1962).
- [36] Devin, B., L. Koch und M. Vandevyver: L'Onde Electrique Nr. 423, 496 (1962).
- [37] Orr, W. L., and M. C. Edmund: Nuclear-fueled Thermionic Converter Experiments. VIII Congresso Nucleare, Rom, 17.—23. Juli 1963.

CDNA01687DEC