

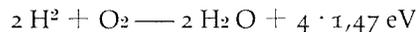
## Radionuklidbatterien

In unserer Arbeitsgruppe beschäftigen wir uns ganz allgemein mit der Einwirkung energiereicher Strahlung auf Materie. Die dabei auftretenden physikalischen Prozesse (Lumineszenzanregung und -zerstörung, Defekterzeugung, Transport von Ladungsträgern und andere mehr) sind Gegenstand der verschiedenen hier durchgeführten Experimente. Im Rahmen dieser Untersuchungen lag es für uns sehr nahe, Möglichkeit und Grenzen der Energieerzeugung mit Hilfe des Systems Radionuklid-Leuchtstoff-Photoelement zu studieren.

In Radionuklidbatterien (RNB) wird die Energie, die beim radioaktiven Zerfall eines instabilen Elementes frei wird, in elektrische Energie umgewandelt. Im wesentlichen waren es zwei Gründe, die zur Idee der RNB führten. Die technische Ausnutzung der Kernspaltung zur Energiegewinnung in Kernkraftwerken schreitet immer weiter fort. Bei der  $U_{235}$ -Spaltung werden pro Spaltakt etwa 200 MeV frei:

$E_{\text{kin}}$	der Spaltprodukte	167 MeV
$E_{\text{kin}}$	der prompten Neutronen	5 MeV
$E_{\text{kin}}$	der prompten $\gamma$ -Quanten	5 MeV
$E_{\text{kin}}$	der verzögerten $\gamma$ -Quanten	5 MeV
$E_{\text{kin}}$	der $\beta$ -Teilchen	5 MeV
$E_{\text{kin}}$	der Antineutrinos	11 MeV
		<hr/>
		198 MeV

Im Vergleich dazu liefert die Reaktion



eine um etwa sieben Größenordnungen geringere Energie

$$(1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-13} \text{ Ws}).$$

Die auftretenden Spaltprodukte sind zum großen Teil wieder radioaktiv. Die Energie dieser Nuklide, die man durch Aufbereitung der Brennelemente gewinnen kann, wollte man doch irgendwie ausnutzen, um die Wirtschaftlichkeit von Kernenergieanlagen zu erhöhen. Es läßt sich z. B. abschätzen, daß aus den in einem Kraftwerk mit einer elektrischen Leistung von 500 Megawatt anfallenden Radionukliden noch weitere 30 Megawatt zu gewinnen sind.

Zum anderen bestand für spezielle Anwendungsgebiete in Raumfahrt, Medizin, Ozeanologie und Meteorologie der Wunsch, völlig wartungsfreie, langlebige Stromquellen hohen Energieinhalts zur Verfügung zu haben.

Wir arbeiten speziell an der photoelektrischen Konversion. Hierbei wird im ersten Schritt ein Leuchtstoff durch einen  $\beta$ -Strahler zur Lumineszenz angeregt. Im zweiten Schritt wird das emittierte Licht dann mit Hilfe von Photoelementen in elektrische Energie umgewandelt. Diese Arbeiten gehen ursprünglich auf die Entwicklung einer quasikonstanten Lichtquelle, bestehend aus Leuchtstoff +  $\beta$ -Strahler, zurück. Die Idee, dieses System mit einem Photoelement zu kombinieren, führte dann zum Bau einer RNB.

Bei der Auswahl geeigneter Radionuklide sind die Halbwertszeit, die Leistungsdichte, Fragen der Abschirmung, die Verfügbarkeit des Nuklids und die biologische Gefährlichkeit bei der Inkorporation zu beachten. Um eine Konstanz der abgegebenen elektrischen Leistung und eine hohe Lebensdauer der Batterie zu erreichen, sollte die Halbwertszeit des Nuklids möglichst ein Mehrfaches der geforderten Betriebsdauer betragen. Speziell im Fall der photoelektrischen Konversion ergeben sich aus dem Auftreten von Strahlungsschäden im Leuchtstoff noch weitere Einschränkungen bei der Nuklidwahl: Es existieren keine ausreichend  $\alpha$ -resistenten Leuchtstoffe. Die Resistenz gegen  $\beta$ -Strahlung nimmt oberhalb 200–300 keV schnell ab, so daß für die photoelektrische Konversion nur die Nuklide  $^3\text{H}$ ,  $^{85}\text{Kr}$  und  $^{147}\text{Pm}$  in Frage kommen. Berücksichtigt man ferner, daß  $^3\text{T}$  und  $^{85}\text{Kr}$  gasförmig sind, bleibt für die Anwendung lediglich  $^{147}\text{Pm}$  mit einer Halbwertszeit von 2,6 Jahren und einer maximalen  $\beta$ -Energie von 220 keV übrig.

Die verwendeten Leuchtstoffe sollen für die Umwandlung der  $\beta$ -Energie in Licht einen möglichst großen Wirkungsgrad haben. Hier empfehlen sich vor allem Cu- und Ag-dotierte Zinksulfid-Leuchtstoffe, deren Energieausbeuten bei  $\beta$ -Anregung etwa 25 Prozent betragen. Sie gehören außerdem neben den Sauerstoffphosphoren zu den Leuchtstoffen mit relativ großer Strahlungsresistenz.

Der bisher entscheidende Nachteil der photoelektrischen RNB ist die Tatsache, daß der Wirkungsgrad von Photoelementen mit abnehmender Beleuchtungsstärke sehr stark abfällt. Im in Frage kommenden Bereich von etwa 10 Lux liegt der Wirkungsgrad von Selenenlementen bei etwa 1 Prozent, der von Siliziumelementen noch darunter.

Die Wahl der Photoelemente selbst hängt von der spektralen Verteilung der Lichtemission ab, da eine gute Konversion nur möglich ist, wenn die Maxima der Emission des Leuchtstoffs und der spektralen Empfindlichkeit des Photoelements übereinstimmen.

Bisher wurden im I. Physikalischen Institut drei Prototypen gebaut. Als Leuchtsubstanz dient ein Gemisch aus  $^{147}\text{Pm}$ -Oxid und einem ZnS/Cu-Phosphor. Die Mischung befindet sich in einer geschlossenen zylinderförmigen

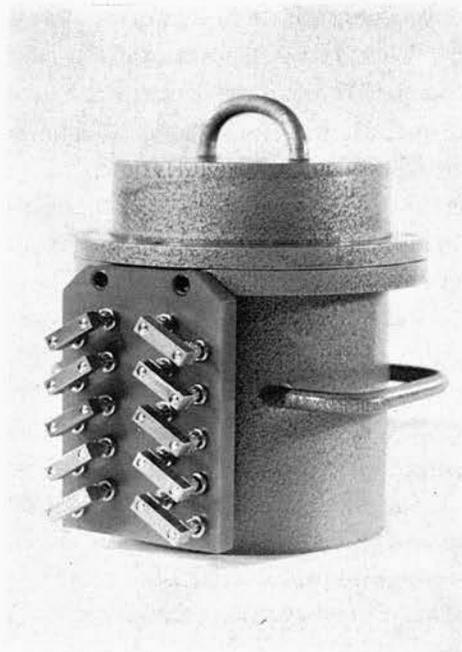


Abb. 1. Ansicht einer in Gießen gebauten photoelektrischen Radionuklid-batterie.

Quarzküvette, an deren Kreisflächen Selen-Photoelemente angebracht sind. Fünf solcher Sandwichanordnungen liefern, in einer Batterie hintereinander angeordnet, eine elektrische Leistung von etwa  $40 \mu\text{W}$ . Der Gesamtwirkungsgrad, der sich als Quotient aus der elektrischen Ausgangsleistung an den Photoelementen und aus der Strahlungsenergie des Nuklids berechnet, liegt bei etwa 0,07 Prozent.

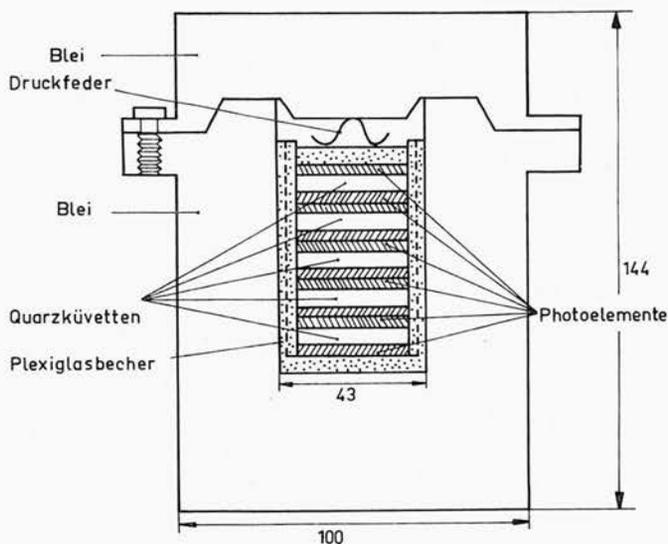


Abb. 2. Prinzipieller Aufbau einer photoelektrischen Radionuklid-batterie.

Faßt man alle Einzelwirkungsgrade und Verlustfaktoren zusammen:

Energieausbeute des ZnS/Cu-Leuchtstoffs	25 Prozent
davon gelangen auf das Photoelement	66 Prozent
Wirkungsgrad des Se-Elements (bei optimaler Anpassung)	1 Prozent
Spektralfaktor	40 Prozent

so erhält man einen Gesamtwirkungsgrad von etwa 0,1 Prozent.

Dieser Wirkungsgrad ist im Vergleich mit RNB anderer Konversionstypen sehr gering. Deshalb ist die Anwendung von RNB mit photoelektrischer Konversion auf Miniaturbatterien, wie sie z. B. in Herzschrittmachern, elektrischen Uhren o. ä. verwendet werden, beschränkt.

Am weitesten fortgeschritten ist die Entwicklung bei Miniaturbatterien mit thermoelektrischer Konversion. Hier wird das  $\alpha$ -aktive Plutoniumisotop Pu 238 zur Beheizung von Thermoelementen verwendet. Zum Einsatz kamen solche Batterietypen als Stromquelle für Herzschrittmacher erstmals im Jahr 1969, wo in den USA und Frankreich in Tierexperimenten die ersten Implantationen vorgenommen wurden. Probleme sind nach wie vor Fragen der biologischen Strahlenbelastung und des Unfallschutzes.

Neben diesem Typ sind für die Versorgung von Herzschrittmachern zur Zeit betavoltaische RNB in Entwicklung. In der betavoltaischen Batterie erzeugt die  $\beta$ -Strahlung des Radionuklids in einer Pn-Siliziumdiode durch Ionisation Ladungsträgerpaare, die im Feld der Sperrschicht getrennt werden und so die Nutzspannung aufbauen.

Hierbei gelten für die  $\beta$ -Energien der Nuklide wegen der Zerstörung der Sperrschicht ähnliche Einschränkungen wie bei photoelektrischen Batterien, so daß ebenfalls nur Pm 147 in Frage kommt. Ein Vorteil der beiden letztgenannten Energieumwandlungsarten ist, daß sie gegenüber der photoelektrischen Konversion im  $\mu$ W- und mW-Bereich einen wesentlich besseren Gesamtwirkungsgrad in der Größenordnung von etwas 1 Prozent besitzen.

In einem weitaus höheren Leistungsbereich liegen Versorgungssysteme für die Raumfahrt, in Navigationsbojen und in automatischen Wetterstationen. In dem hier in Frage kommenden Bereich von etwa 20 bis 100 Watt werden zur Zeit ausschließlich thermoelektrische RNB eingesetzt. Als Radionuklide benutzt man für terrestrische Zwecke Sr 90, in der Raumfahrt »exotische« Nuklide wie Pn 238, Cm 242 und Po 210. Durch spezielle Techniken in der Anordnung und Wahl der Thermoelemente erreicht man Gesamtwirkungsgrade von zehn Prozent und mehr.

Noch bessere Wirkungsgrade lassen RNB erwarten, die nach dem thermionischen Prinzip arbeiten. Hierbei wird durch die thermische Elektronenemission

eines aufgeheizten Emitters ein gekühlter Kollektor negativ aufgeladen. Technologische Probleme, wie die Beherrschung der erforderlichen optimalen Emittertemperaturen von 1600–1800 Grad C und die Beseitigung von Raumladungseffekten haben bisher den Einsatz dieses vielversprechenden Typs verhindert.

Es existieren noch eine Reihe anderer Konversionsarten von untergeordneter Bedeutung, wie die direkte Aufladung von Elektroden durch die Spaltteilchen oder die Ladungstrennung durch die Kontaktpotentialmethode.

In der folgenden Tabelle sind die Eigenschaften einiger gebauter bzw. in Bau befindlicher RNB zusammengestellt.

Batterie	Konversion	Nuklid	el. Leistung Watt	$\eta$ %	Aktivität kCi	max. Lebensdauer	Verwendung
SNAP 7 C	thermoelekt.	Sr 90	10	4	42	10 a	Wetterstation
SNAP 27	thermoelekt.	Pu 238	56	—	—	—	Apolloprojekt
SNAP 29	thermoelekt.	Po 210	400	—	—	90 d	Satelliten
Betacel	betavoltaisch	Pm 147	$2 \cdot 10^{-4}$	0,8	—	10 a	Miniaturbatterie
Isomite	thermionisch	Pu 238	$2 \cdot 10^{-2}$	0,6	—	10 a	Miniaturbatterie
Giessen	photoelekt.	Pm 147	$4 \cdot 10^{-5}$	0,07	0,5	—	Miniaturbatterie

Die zur Zeit leistungsstärkste Batterie ist die nach dem thermoelektrischen Prinzip arbeitende SNAP 29 mit 400 Wel. Sie ist für die Stromversorgung in amerikanischen Erdsatelliten gedacht.

Für Leistungen oberhalb 1 kW kommen stationäre RNB nicht mehr in Frage. Hier bieten sich dynamische Wandler, kombiniert mit konventionellen Generatoren an, in denen die Zerfallsenergie über die Zwischenstufen Wärme und mechanische Energie in elektrische Energie umgewandelt wird. Alle dynamischen Wandler verlieren aber durch die Verwendung bewegter Teile den entscheidenden Vorteil der RNB, ohne jede Wartung über Jahre hinaus elektrische Energie zu liefern.

Radionuklidbatterien können und werden natürlich die konventionellen Batterien nicht ersetzen. Man wird sie nur dort zum Einsatz bringen, wo ihre unbestreitbaren Vorteile zum Tragen kommen. Diese liegen vor allem darin, daß Verbraucher jahrelang ohne jede Wartung mit elektrischer Energie versorgt werden können. Für eine Anwendung ist immer die Wirtschaftlichkeit entscheidend, das gilt im übertragenen Sinne auch für die Weltraumfahrt. Ist, wirtschaftlich gesehen, auf der Erde der Preis entscheidend, so wird im Welt- raum die Masse ausschlaggebend sein. Um ein Beispiel zu nennen: Die ersten kommerziellen RNB der Firma Martin-Marietta Co., die in automatischen Wetterstationen eingesetzt wurden und im Leistungsbereich zwischen 25 und

50 Watt lieferbar waren, kosteten zwischen 56 000 und 124 000 Dollar. Hierin spiegelt sich der große finanzielle Aufwand in der Entwicklung dieser Batterien wider.

Um den Anschluß an die Entwicklungen in den USA und der UdSSR nicht zu verlieren, entschloß sich das Bundesministerium für Bildung und Wissenschaft, in einem Fünfjahresplan die Arbeiten in der BRD gezielt zu fördern. Darüber hinaus haben sich die europäischen Länder im Rahmen der OECD/ENEA zu einem gemeinsamen Entwicklungsprogramm entschlossen.

Im Rahmen dieser Forschungsprogramme gilt unser Interesse nicht kommerziellen Gesichtspunkten, sondern den prinzipiellen Möglichkeiten der photoelektrischen Energiekonversion und ihren Grenzen.