

**KERNFORSCHUNGSZENTRUM
KARLSRUHE**

Mai 1969

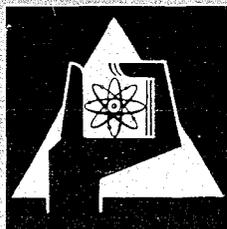
KFK 1001

Abteilung Reaktorbetrieb und Technik

In-Pile-Betrieb eines thermionischen Wandlers

W. Marth

A. Jester (BBC, Mannheim)



GESELLSCHAFT FÜR KERNFORSCHUNG M. B. H.
KARLSRUHE

In-Pile-Betrieb eines thermionischen Wandlers · In-pile operation of a thermionic converter

Herrn Professor Born zum 60. Geburtstag gewidmet

A. Jester Brown, Boveri & Cie. AG, Mannheim

W. Marth Abteilung Reaktorbetrieb und Technik, Gesellschaft für Kernforschung, Karlsruhe

1. Einleitung

Die Versorgung von Weltraumsatelliten mit elektrischer Energie ist eines der Hauptprobleme in der Entwicklung der Raumfahrttechnik. Der Bedarf an elektrischer Leistung für Satelliten wird in den nächsten Jahren auf etwa 20 bis 100 kW pro Satellit ansteigen, wobei eine Lebensdauer von 1 bis 3 Jahren angestrebt wird. Kernreaktoren in Verbindung mit thermionischen Wandlern, welche die nukleare Spaltungswärme auf *direktem* Weg in elektrische Energie umwandeln, bieten bezüglich der spezifischen Leistung günstige Voraussetzungen. Für die Entwicklung und den Bau eines solchen In-Core-Thermionik-Reaktors (ITR) haben die Firmen BBC, Interatom und Siemens im Auftrag des Bundesministeriums für wissenschaftliche Forschung bereits intensive Vorarbeiten geleistet [1].

Seit 1960 arbeitet BBC auf dem Gebiet der thermionischen Direktumwandlung. Im Labor wurden mit thermionischen Wandlern Leistungsdichten von 10 W/cm^2 und Lebensdauern von über 10 000 h erzielt. In zwei Bestrahlungsversuchen (200 h und 1250 h) im Reaktor FR 2 in Karlsruhe wurden thermionische Emittler erfolgreich getestet. Erste In-Pile-Ergebnisse mit kompletten thermionischen Wandlern (Cs-Dioden, bestehend aus Emittler und Kollektor) wurden in zwei Kurzversuchen (30 h und 100 h) im Reaktor Ispra 1 erzielt [2–5].

Die bei diesen Versuchen gewonnenen Erfahrungen bilden die Grundlage für einen Langzeitbestrahlungstest mit einem

1. Introduction

The electric power supply for satellites is one of the main problems of space technology. Within the next few years the power requirements are likely to increase to about 20 to 100 kW per satellite, with a desirable lifetime between one and three years. The combination of nuclear reactors with thermionic converters, which convert the thermal energy of nuclear fission *directly* into electric energy, offers favourable possibilities as far as the specific power output is concerned. Considerable preliminary work on the development and design of such an in-core thermionic reactor (ITR) has been carried out by the firms BBC, Interatom and Siemens on behalf of the Federal Ministry for Scientific Research [1].

BBC has been working in the field of direct thermionic conversion since 1960. In the laboratory, power output densities of 10 W/cm^2 and lifetimes in excess of 10 000 h have already been achieved with thermionic converters. Thermionic emitters have been successfully tested in two irradiation experiments (200 h and 1250 h) in the FR 2 reactor in Karlsruhe. First in-pile results with complete thermionic converters (Cs diodes consisting of an emitter and a collector) were obtained in two short experiments (30 h and 100 h) in the reactor Ispra 1 [2–5].

The experience gained in these experiments provided the basis for a long term irradiation experiment with a thermionic

thermionischen Wandler. Er wurde im FR 2 durchgeführt und soll nun mit seinen Ergebnissen kurz beschrieben werden.

2. Versuchsaufbau

Das Kernstück der Versuchseinrichtung bildet der thermionische Wandler. Er befindet sich in einer evakuierten Bestrahlungskapsel, welche zusammen mit einer Ionengetterpumpe und zwei Abschirmstopfen den Reaktoreinsatz bilden (Fig. 1). Die Bestrahlung erfolgte im vertikalen Zentralkanal des FR 2, der am Ort der Bestrahlungskapsel einen verfügbaren Durchmesser von 130 mm besitzt.

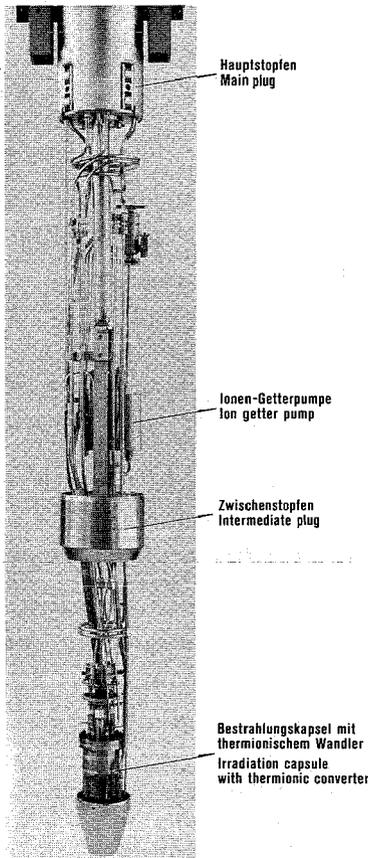


Fig. 1: Reaktoreinsatz. Das Hubwerk befindet sich (hier unsichtbar) am oberen Ende des Hauptstopfens.

Fig. 1: In-pile rig. The hoisting device, not visible in the photograph, is located at the top end of the main plug.

Der Molybdänemitter (Fig. 2) mit 16 mm Durchmesser und 40 mm aktiver Länge ist mit 5,25 g Urandioxid (auf 93% U 235 angereichert) gefüllt, das als Pulver in 15 Bohrungen der Wand eingerüttelt wurde. Auf Entlüftung der gasförmigen Spaltprodukte wurde verzichtet. Der umgebende Kollektor (Fig. 3) besteht aus Niob, in den zur Verbesserung der Wandlereigenschaften eine Molybdänbüchse eingelötet ist. Der Elektrodenabstand von 0,2 mm im kalten Zustand wird oben durch eine vakuumdichte Metall-Keramik-Verbindung und unten durch eine gleitende Zentriermembran aufrechterhalten. Der im Wandler erforderliche Cäsiumdruck (etwa 10 Torr) wird über die Temperatur eines Cäsiumvorratsgefäßes eingestellt. Die am Kollektor anfallende Verlustwärme wird durch Strahlung an einen Leichtwasserkühlkreislauf übertragen. Um eine große Oberfläche zu erzielen, sind am Kollektor 36 Molybdänfinnen radial angelötet, in deren Zwischenräume von außen die gleiche Zahl wassergekühlter Kupferbleche ragen. Eine Wolframwendel in der zentralen Bohrung des Emitters ermöglicht es, die nukleare Aufheizung des Emitters durch Elektronenbeschuss elektrisch zu simulieren und so die elektrischen Betriebsdaten im Labor aufzunehmen.

converter. This was conducted in the FR 2 reactor and is briefly described in this communication.

2. Experimental layout

The core of the experimental apparatus is the thermionic converter. It is located in an evacuated irradiation capsule which, together with an ion getter pump and two shielding plugs, forms the in-pile rig (Fig. 1). This rig was irradiated in the vertical central channel of the FR 2 which has the required clear diameter of 130 mm at the location of the irradiation capsule.

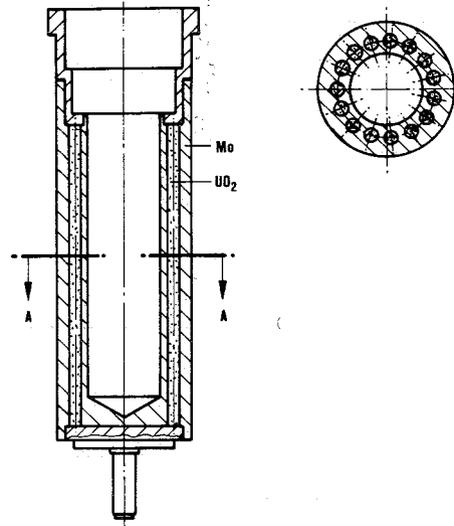


Fig. 2: Emittor mit 15 verschlossenen Bohrungen für UO₂-Pulver
Fig. 2: Emittor, with 15 closed borings for UO₂-Pulver

The molybdenum emitter (Fig. 2) has a diameter of 16 mm and an active length of 40 mm. It has 15 drilled holes in the wall which were filled with 5,25 g of powdered uranium dioxide enriched to 93% U 235. No measures were taken to vent gaseous fission products. The surrounding collector (Fig. 3) consists of niobium; a molybdenum sleeve is soldered

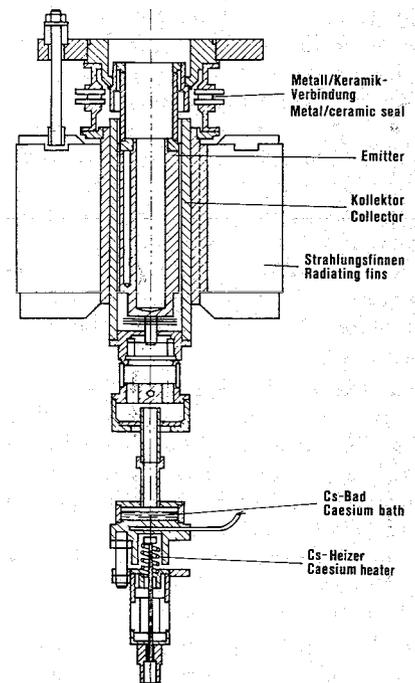


Fig. 3: Schnitt durch den thermionischen Wandler
Fig. 3: Section through the thermionic converter

Während des In-Pile-Betriebs ist die Wendel als Widerstandsthermoelement geschaltet und wird zur Emittertemperaturmessung herangezogen.

Der Wandler befindet sich in einer evakuierten Bestrahlungskapsel, die zusammen mit der Ionengetterpumpe ein geschlossenes System bildet (Fig. 1). Die Ionengetterpumpe ist durch einen 100 mm dicken Zwischenstopfen aus Blei gegen die Reaktorstrahlung abgeschirmt, wodurch die ursprüngliche γ -Aufheizung von etwa 0,5 W/g um mehr als zwei Größenordnungen reduziert wird. Die im Zwischenstopfen anfallende Wärme wird über den erwähnten Kollektorkreislauf abgeführt. Ein zweiter Kreislauf, der gegen den Kollektorkreislauf elektrisch isoliert ist, übernimmt die an den Emittierzuleitungen auftretende Wärme. Die Nickelleitungsrohre der beiden Kreisläufe dienen zugleich als Hochstromleitungen. Die Ionengetterpumpe wird durch einen dritten Kreislauf gekühlt. Bestrahlungskapsel und Zwischenstopfen hängen am sog. Hauptstopfen, der den Kanal nach außen abschirmt. Er enthält zur Aufnahme der Meß-, Kühl- und Versorgungsleitungen 12 einfach gewendelte Edelstahlrohre und ist mit einer optimierten Füllung aus Abschirmmaterialien vergossen. Am oberen Ende des Hauptstopfens ist ein mechanisches Hubwerk angebracht, womit der Reaktoreinsatz in der Höhe um 50 cm auch während des Reaktorbetriebs bewegt werden kann. Somit ist es möglich, die Neutronenflußdichte am Ort des Wandlers um eine Größenordnung von $2 \cdot 10^{12}$ auf $2 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ zu ändern, wodurch die im Emittler erzeugte nukleare Leistung eingestellt werden kann.

Während des Betriebs wurden folgende Meßwerte registriert und durch Grenzwertkontakte überwacht:

Kühlwasserdurchsatz und -temperatur an Kollektor-, Emittler- und Pumpenkreis, Diodenstrom und -spannung, Vakuum der Bestrahlungskapsel, Temperaturen an Emittler, Kollektor, Cäsiumvorratsgefäß und Metall-Keramik-Verbindung. Hiervon waren zusätzlich Diodenstrom und Kühlwasserdurchsatz des Kollektorkreises auf die Schnellabschaltlinie des Reaktors aufgeschaltet.

3. Versuchsbetrieb

Zur Vorbereitung des Versuchsbetriebs wurde der thermionische Wandler in einem Vakuumformierstand ausgeheizt und bei einem Druck von weniger als 10^{-7} Torr zugelötet. Dem Einbau des Wandlers in die Bestrahlungskapsel folgte die Aufnahme der Strom-Spannungskurven, wobei der Emittler über die Wolframwendel durch Elektronenbeschuß aufgeheizt wurde. Fig. 4 zeigt die Kurven konstanter Emittertemperatur (Wechselstrombetrieb) und konstanter Eingangsleistung (Gleichstrombetrieb) sowie die dabei gemessenen Wirkungsgrade. Der Endmontage des Reaktoreinsatzes folgte eine umfassende Out-of-Pile-Erprobung mit anschließendem Einbau in den Reaktorkanal.

Nachdem der Reaktor seine Nennleistung von 44 MW erreicht hatte, begann der Versuchsbetrieb. Mit Hilfe des Hubwerkes wurde der Reaktoreinsatz schrittweise in Richtung höherer Neutronenflußdichte abgesenkt, und in jeder Position wurden die charakteristischen Stromspannungskurven aufgenommen (Fig. 5). Nach Erreichen der gewünschten Langzeitbetriebswerte wurde auf Dauerbetrieb umgeschaltet.

Charakteristische Betriebsdaten während des Langzeittests waren:

Emittertemperatur	1400 . . . 1500 °C,
Kollektortemperatur	600 . . . 700 °C,
Cäsiumtemperatur	350 °C,
Ausgangsleistung	etwa 70 W.

on the inside of the collector to improve the conversion efficiency. The spacing of the electrodes, which is 0.2 mm in the cold state, is maintained at the top by means of a vacuum-tight metal/ceramic seal and, at the bottom, by a sliding centring membrane. The caesium vapour pressure of approx. 10 Torr required in the converter is controlled by controlling the temperature of a caesium supply container. The waste heat surplus in the collector is radiated off and is removed by a light water cooling circuit. In order to increase the radiating area, 36 radial fins in molybdenum are brazed on the outside of the collector, with 36 water-cooled copper strips projecting into the spaces between these fins. A tungsten coil located in the central boring of the emitter makes it possible to simulate the nuclear heating of the emitter by electric heating by electron bombardment in order to determine the electrical operating data in the laboratory. During in-pile operation, the tungsten coil is connected as a resistor thermocouple and is used for measuring the temperature of the emitter.

The converter is located in an evacuated irradiation capsule which forms a closed system with the ion getter pump (Fig. 1). The ion getter pump is shielded against the reactor radiation by a 100 mm thick intermediate plug of lead; this reduces by more than two orders of magnitude the unshielded gamma heat generation of about 0,5 W/g. The heat generated in the lead plug is evacuated by the collector cooling circuit mentioned above. A second cooling circuit, which is electrically insulated from the collector cooling circuit, removes the heat generated in the emitter leads. The nickel tubes of these two circuits serve at the same time as high current leads. The ion getter pump is cooled by a third circuit. The irradiation capsule and the intermediate plug are suspended from the so-called main plug which shields the channel on the outside. This plug is traversed by measurement, cooling and supply leads passing through 12 stainless steel tubes, cast into an optimised mix of shielding materials. A mechanical hoisting device is attached to the top end of the main plug, which makes it possible to move the rig vertically by 50 cm during the operation of the reactor. This makes it possible to vary the neutron flux density at the location of the converter by one order of magnitude, between 2×10^{12} and $2 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$, for the purpose of adjusting the nuclear power generated in the emitter.

The following measured values were recorded and were monitored by means of limit value contacts during the experiment:

Cooling water throughput and temperatures in the collector, the emitter and the ion getter pump circuits, diode current and voltage, vacuum in the irradiation capsule, and the temperatures at the emitter, the collector, the caesium supply vessel and the metal/ceramic seal. Of these, the measurements of the diode current and of the cooling water throughput of the collector cooling circuit were also supplied to the reactor scram circuits.

3. Operation

Before the experiment, the thermionic converter was heated in a vacuum stand and was sealed under a pressure of less than 10^{-7} Torr. After the converter was built into the irradiation capsule, the current/voltage curves were recorded, heating the emitter by electron bombardment by means of the tungsten coil. Fig. 4 shows the curves at constant emitter temperature (AC operation) and at constant input power (DC operation), and the efficiency curves determined in these

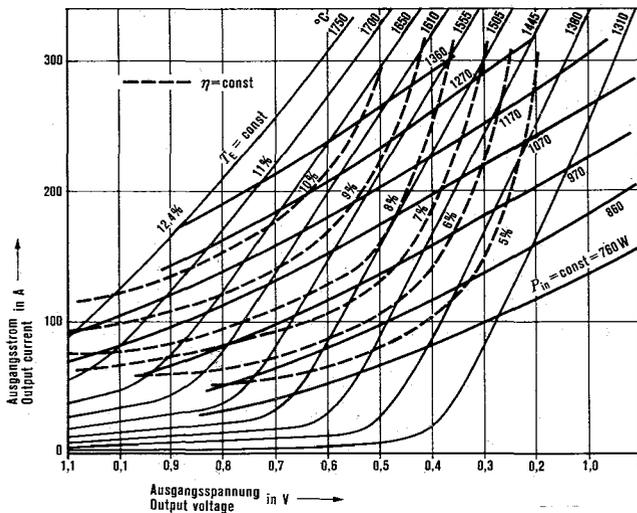


Fig. 4: Strom-Spannungs-Kennlinien bei elektrischer Beheizung (Out-of-Pile). Dünn: Kurven konstanter Emittertemperatur; dick: Kurven konstanter Eingangsleistung; gestrichelt: Kurven konstanten Wirkungsgrads
 Fig. 4: Current/voltage curves with electric (out-of-pile) heating. Thin lines: Curves at constant emitter temperature; Heavy lines: Curves at constant power input; Broken lines: Curves at constant efficiency

Die Schwankungen der Betriebswerte haben ihre Ursache in der Bewegung der Regelstäbe, wodurch das Flußdichteprofil verändert wird. Im Verlauf dieses Langzeittests war der Wandler 3750 h in Betrieb und überstand 20 Reaktorabschaltungen. Er erzeugte eine elektrische Energie von 260 kWh, was einem errechneten relativen Abbrand von 2,63%, bezogen auf U 235, entspricht.

Die Ursache für das Ende des Versuchs war ein Kurzschluß zwischen Emittent und Kollektor des Wandlers. Schon während des Betriebs waren teilweise Kurzschlüsse aufgetreten, die sich jedoch durch Anlegen einer äußeren Spannung wieder wegbrennen ließen. Zur genauen Analyse des Bestrahlungsverhaltens des Wandlers wird eine Untersuchung in den heißen Zellen vorbereitet.

Bei der Planung und Durchführung des Experimentes haben die Herren Th. Ertel, G. Harbauer und W. Steiger (GfK Karlsruhe) sowie die Herren H. Holick, P. Kitzbühler, R. Krapf und R. Zöllner (BBC Heidelberg) mitgewirkt. — Die Arbeit wurde teilweise vom Bundesministerium für wissenschaftliche Forschung unterstützt.

(Eingegangen am 2. 12. 1968)

Literatur - References

- [1] Gemeinsames Angebot der Firmen BBC, Interatom und Siemens für Entwicklung und Bau einer terrestrischen Versuchsanlage eines Incore-Thermionik-Reaktors
- [2] Groß, F., H. Holick und A. Jester: Ein thermionischer Energiewandler mit zylindrischen Elektroden. BBC-Nachrichten 48, Nr. 3, 167 (1966)
- [3] Groß, F., und H. Winkenbach: Irradiation Studies with UO₂-Fueled Molybdenum Emitters. Thermionic Conv. Specialist Conf., Houston, Texas, USA, Oct. 1966
- [4] Jester, A., F. Groß, H. Holick, R. Krapf und C. A. Busse: Bestrahlungsvorversuch an einem nuklear beheizten thermionischen Energiewandler. BBC-Nachrichten 49, Nr. 10, 4 (1967)
- [5] Jester, A., F. Groß, H. Holick, R. Krapf und R. Zöllner: Laboratory Life Test and Inpile Irradiation Studies of Cylindrical Thermionic Converters. 2nd Int. Conf. on Thermionic Electrical Power Generation, Stresa, Italy, May 1968

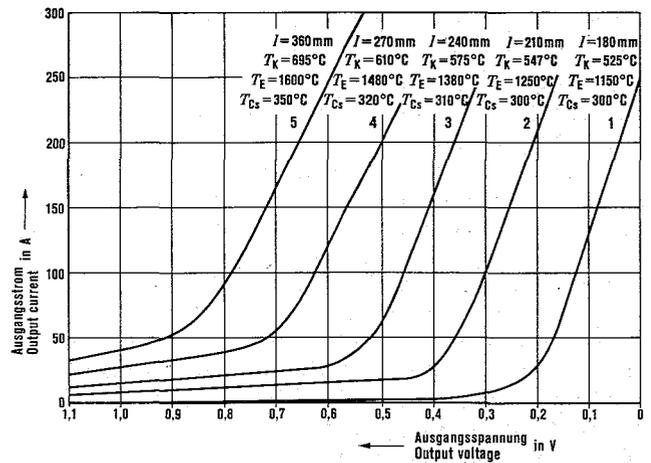


Fig. 5: Strom-Spannungs-Kennlinien bei verschiedenen Einfahrtiefen des Reaktoreinsatzes. *l* Einfahrtiefe, T_K Kollektortemperatur, T_E Emittertemperatur, T_{Cs} Cs-Temperatur

Fig. 5: Current/voltage curves at different depths of rig insertion. *l* insertion depth in mm; T_K , T_E and T_{Cs} temperatures of collector, emitter and caesium, respectively

measurements. Before the rig was built into the reactor channel, it was subjected to extensive out-of-pile tests.

The experiment was started after the reactor had reached its nominal power of 44 MW. The in-pile rig was lowered step by step, by means of the hoist device, in the direction of higher neutron flux densities, and the characteristic current/voltage curves were recorded for each position (Fig. 5). When the desired long term operation values were reached, the mode of operation was changed to continuous.

The characteristic operational data recorded during the long term test were:

Emitter temperature	1400 to 1500 °C
Collector temperature	600 to 700 °C
Caesium temperature	350 °C
Power output	appr. 70 W

The variations of the operational data observed during the test were due to movements of the reactor control rods which alter the flux density profile. In the course of this long term test the converter was in operation for 3750 h and withstood 20 reactor shutdowns. It produced 260 kWh of electric energy, corresponding to a calculated relative burn-up of 2,63% based on U 235.

The experiment was terminated owing to a short-circuit between the emitter and the collector of the converter. Partial short-circuits had occasionally occurred during the experiment, but could be burnt out by applying an external voltage. Preparations for the examination of the converter in the hot cells, for the purpose of an accurate analysis of its performance under irradiation, are in progress.

Messrs. Th. Ertel, G. Harbauer and G. Steiger (GfK Karlsruhe), and H. Holick, P. Kitzbühler, R. Krapf and R. Zöllner (BBC Heidelberg), worked with us in the planning and the execution of the experiment. The work was partly supported by the Federal Ministry of Scientific Research.