EUR 4239 d

EUROPÄISCHE ATOMGEMEINSCHAFT - EURATOM

HERSTELLUNGSVERFAHREN UND UNTERSUCHUNG VON MEHRSCHICHTROHREN FÜR THERMIONIK-KONVERTER

Übersicht und jetziger Stand

von

P. FIEBELMANN

1969

Gemeinsame Kernforschungsstelle
Forschungsanstalt Ispra - Italien

Hauptabteilung Engineering
Technologie

HINWEIS

Das vorliegende Dokument ist im Rahmen des Forschungsprogramms der Kommission der Europäischen Gemeinschaften ausgearbeitet worden.

Es wird darauf hingewiesen, dass die Kommission der Europäischen Gemeinschaften, ihre Vertragspartner und die in deren Namen handelnden Personen :

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;

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.

Dieser Bericht wird in den auf der vierten Umschlagseite genannten Vertriebsstellen

zum Preise von DM 3,20	FF 4,–	FB 40,–	Lit. 500	Fl. 3,–

verkauft.

Es wird gebeten, bei Bestellungen die EUR-Nummer und den Titel anzugeben, die auf dem Umschlag jedes Berichts aufgeführt sind.

Gedruckt von Smeets
Brüssel, Juni 1969

Das vorliegende Dokument wurde an Hand des besten Abdruckes vervielfältigt, der zur Verfügung stand.

EUR 4239 d

HERSTELLUNGSVERFAHREN UND UNTERSUCHUNG VON MEHRSCHICHTROHREN FÜR THERMIONIK-KONVERTER - Übersicht und jetziger Stand
von P. FIEBELMANN

Europäische Atomgemeinschaft - EURATOM
Gemeinsame Kernforschungsstelle - Forschungsanstalt Ispra (Italien)
Hauptabteilung Engineering - Technologie
Luxembourg, Juni 1969 - 22 Seiten - 5 Abbildungen - FB 40

Für verschiedene Thermionik-Reaktor-Konzepte wird eine Übersicht gegeben über Mehrschichtrohre, die beim Bau Verwendung finden sollen. Bekannt gewordene Herstellungsverfahren werden mitgeteilt und einige Hauptmerkmale tabellarisch zusammengestellt. Es werden Kenndaten empfohlen, die zur Charakterisierung eines Mehrschichtrohres erforderlich erscheinen. Die in Ispra durchgeführten Untersuchungen werden mitgeteilt.

EUR 4239 d

FABRICATION METHODS FOR AND STUDY OF SANDWICHES FOR THERMIONIC CONVERTES - Survey and present situation
by P. FIEBELMANN

European Atomic Energy Community - EURATOM
Joint Nuclear Research Center - Ispra Establishment (Italy)
Engineering Department - Technology
Luxembourg, June 1969 - 22 Pages - 5 Figures - FB 40

A survey is given on sandwiches intended to be used for different thermionic reactor concepts. Fabrication methods known to the author are mentioned. Some of the main features are tabulated. Characteristic values are recommended for sandwiches.
Tests carried out at EURATOM, Ispra, are communicated.

EUR 4239 d

FABRICATION METHODS FOR AND STUDY OF SANDWICHES FOR THERMIONIC CONVERTES - Survey and present situation
by P. FIEBELMANN

European Atomic Energy Community - EURATOM
Joint Nuclear Research Center - Ispra Establishment (Italy)
Engineering Department - Technology
Luxembourg, June 1969 - 22 Pages - 5 Figures - FB 40

A survey is given on sandwiches intended to be used for different thermionic reactor concepts. Fabrication methods known to the author are mentioned. Some of the main features are tabulated. Characteristic values are recommended for sandwiches.
Tests carried out at EURATOM, Ispra, are communicated.

EUR 4239 d

EUROPÄISCHE ATOMGEMEINSCHAFT - EURATOM

HERSTELLUNGSVERFAHREN UND UNTERSUCHUNG VON MEHRSCHICHTROHREN FÜR THERMIONIK-KONVERTER

Übersicht und jetziger Stand

von

P. FIEBELMANN

1969

Gemeinsame Kernforschungsstelle
Forschungsanstalt Ispra - Italien

Hauptabteilung Engineering
Technologie

SCHLAGWORTE

THERMIONICS
CONVERSION
TUBES
FABRICATION

Seite

INHALTSVERZEICHNIS

ZUSAMMENFASSUNG 5

EINFÜHRUNG 5

1. VERFAHREN ZUR HERSTELLUNG VON MEHRSCHICHTROHREN 6

2. EIGENSCHAFTEN UND CHARAKTERISTISCHE KENNDATEN 8

2.1 Allgemeine Eigenschaften 8

2.2 Technologische Eigenschaften 11

3. UNTERSUCHUNG VON MEHRSCHICHTROHREN 12

4. SCHLUSSBEMERKUNG 14

LITERATURHINWEISE 15

Tabelle 1 17

Tabelle 2 18

Tabelle 3 19

Tabelle 4 20

Figuren 1 bis 3 21

Figur 4 und 5 22

HERSTELLUNGSVERFAHREN UND UNTERSUCHUNG VON MEHRSCHICHTROHREN FÜR THERMIONIK-KONVERTER *)

ZUSAMMENFASSUNG

Für verschiedene Thermionik-Reaktor-Konzepte wird eine Übersicht gegeben über Mehrschichtrohre, die beim Bau Verwendung finden sollen. Bekannt gewordene Herstellungsverfahren werden mitgeteilt und einige Hauptmerkmale tabellarisch zusammengestellt. Es werden Kenndaten empfohlen, die zur Charakterisierung eines Mehrschichtrohres erforderlich erscheinen. Die in Ispra durchgeführten Untersuchungen werden mitgeteilt.

EINFÜHRUNG

Zur Realisierung der meisten Thermionik-Reaktor-Konzepte sind röhrenförmige Metall-Keramik-Metall-Bauteile notwendig, sogenannte Mehrschichtrohre oder Sandwiche.

Ein Mehrschichtrohr besteht i.a. aus 3 konzentrischen Rohren, einem metallischen Aussenrohr, einer elektrischen Isolierschicht und dem metallischen Kollektor im Inneren.
Es hat folgende Hauptaufgaben:

1. Elektrische Isolierung der einzelnen thermionischen Zellen im Konstruktionsverband,
2. Abwärmetransport aus den Zellen in radialer Richtung nach aussen bei einer möglichst kleinen Temperaturdifferenz,
3. Gewährleistung der mechanischen Einheit und des Schutzes der Zellen vor korrosivem Angriff durch das Kühlmittel.

Die Entwicklung der thermionischen Konverter ist in den letzten Jahren stark vorangetrieben worden, die der Mehrschichtrohre jedoch nicht. Daher existieren noch keine zufriedenstellende Mehrschichtrohre zur allgemeinen Verwendung. In verschiedenen Laboratorien werden solche Rohre entwickelt und hergestellt. Die meisten Verfahren sind aber noch im Versuchsstadium. Eine Entscheidung darüber, welchem Verfahren der Vorzug zu geben ist, lässt sich zur Zeit nicht fällen.

---

*) Manuskript erhalten am 9. Dezember 1968.

Je nach Anwendungszweck werden sich einige Verfahren herauskristallisieren. Die in Ispra entwickelten Mehrschichtrohre sind nach Mitteilung von BBC, Mannheim von grossem Interesse für das ITR-Projekt (1). Für die Entwicklung stehen jedoch nur sehr beschränkte Mittel zur Verfügung.

In Tabelle 1 sind die bekanntgewordenen Konzepte bezw. Projekte von Thermionik-Reaktoren *) sowie die geforderten Abmessungen, Werkstoffe und Daten der jeweils erforderlichen Mehrschichtrohre zusammengestellt (1 - 5). Als Isolator ist hauptsächlich Al_2O_3 und als Hüllwerkstoff Nb vorgesehen. Die Betriebstemperaturen betragen 700 bis 800°C, die Wärmeflüsse 60 bis 92 W/cm^2 und die Betriebsspannungen sind kleiner als 50 V. Eine Ausnahme bildet ein W/BeO/W-Sandwich mit 400 W/cm^2 und 400 V.

1. VERFAHREN ZUR HERSTELLUNG VON MEHRSCHICHTROHREN

Die Schwierigkeit, gute Mehrschichtrohre für Betriebstemperaturen bis 1000°C herzustellen, beruht wesentlich auf der Schwierigkeit, reproduzierbar ganzflächige Kontakte zwischen Metall- und Keramikflächen herzustellen, um den bestmöglichen Wärmeübergang zu erzielen sowie eine gleichbleibende elektrische Isolierung zu gewährleisten. In Tabelle 2 sind die verschiedenen bekanntgewordenen Herstellungsverfahren von Mehrschichtrohren zusammengestellt.
Es wird eine qualitative Übersicht über die mit diesen Verfahren hergestellten Mehrschichtrohre gegeben. Im Hinblick auf eine Verwendung im Reaktor erscheinen die Lösungen interessant, bei denen sich möglichst kein Fremdmaterial zwischen dem Metalloxyd und der Hülle bzw. dem Kollektor befindet.
Bei einigen Herstellungsverfahren wird die Isolierschicht erzeugt durch einen CVD **) - Prozess (6) durch Plasmasprayverfahren (7) oder durch Sinterverfahren (8, 9).

---

*) Stand: Second International Conference on Thermionic Power Generation, Stresa, 27-31 May, 1968.

**) Chemical Vapor Deposition.

Die Metalloxydschichtdicke und -länge sind hier beliebig. Der Isolationswiderstand ist i.a. örtlich variabel. Bei einem Verfahren wird die Isolierschicht dadurch gewonnen, dass man Al_2O_3 bei der Schmelztemperatur in einen Spalt zwischen zwei konzentrische Mo-Rohre fliessen lässt (RCA) [10].
Bei einer Reihe anderer Herstellungsverfahren, die vorzugsweise von EURATOM in Ispra verfolgt werden, geht man von dichtgesinterten Reinoxydkeramikröhrchen aus (Al_2O_3, BeO), die durch Lötverfahren oder mit Hilfe von isostatischem Heisspressen mit den metallischen Partnern verbunden werden. Diese Verfahren setzen teilweise Metallisierungsprozesse voraus, über die an anderer Stelle berichtet wurde [11, 12].
Die Herstellungslänge sowie die Dicke der Isolierschicht hängen dabei von der Herstellbarkeit der benötigten Keramikröhrchen ab. Europäische und US-amerikanische Firmen (Feldmühle, General Electrics) liefern entsprechende Röhrchen aus hochreinem dichtgesinterten Al_2O_3 mit Wandstärken von 0.5 bzw. 0.2 mm und Längen bis 150 mm, Abmessungen, die für die meisten Konzepte ausreichend sind.
Hauptvorteile sind:

- genau definierte Eigenschaften der elektrischen Isolierung,
- wenig oder kein Fremdmaterial in den Übergangschichten.

Zu dieser Gruppe von Mehrschichtkörpern kann man auch solche zählen, bei denen zB. die Nb-Metallisierungsschicht auf elektrolytischem Wege verstärkt wird.

Es sind auch Untersuchungen durchgeführt worden, bei denen Metall- und Keramikröhrchen ineinandergefügt werden ohne metallurgische Bindung [13, 14].
Die sich im Betriebszustand einstellende Temperaturverteilung erzeugt Flächenpressungen, denen ein bestimmter Wärmeübergang zugeordnet ist.
Solche Mehrschichtrohre sollen hier nicht betrachtet werden. Der jeweilige Wärmewiderstand hängt von der Betriebstemperatur und dem Kriechverhalten der beteiligten Werk-

stoffe unter Betriebsbedingungen ab, wie auch von Herstellungstoleranzen und Oberflächenbeschaffenheiten, d.h. die im Betrieb zu erwartenden Wärmeübergänge sind variabel und nicht genau voraussagbar. Nach eigenen Untersuchungen können solche Systeme zu instabilem Betriebsverhalten neigen.

2. EIGENSCHAFTEN UND CHARAKTERISTISCHE KENNDATEN

Die Eigenschaften von Mehrschichtrohren lassen sich aufteilen in allgemeine- und technologische Eigenschaften. Die meisten Eigenschaften sollten auch im Reaktorstrahlenfeld und nach Reaktorbestrahlung angegeben werden können.

2.1 Allgemeine Eigenschaften

Zur Charakterisierung der allgemeinen Eigenschaften eines Mehrschichtrohres ist die Angabe bestimmter vergleichbarer Kenndaten erforderlich. Da in der Literatur solche Daten noch nicht genannt wurden und etwaige Zahlenangaben über ausgeführte Mehrschichtrohre sehr spezifischer Art sind, werden allgemeine charakteristische Kenndaten vorgeschlagen. Die betrachteten Daten, die sich als Kenndaten zur Beurteilung von Mehrschichtrohren heranziehen lassen, sind in Tabelle 3 zusammengestellt.

Die Qualität eines Mehrschichtrohres richtet sich im wesentlichen nach dem gesamten Wärmewiderstand, den es einem radialen Wärmestrom entgegensetzt. Der gewünschte elektrische Widerstand lässt sich immer erreichen. Trotzdem ist eine zahlenmässige Angabe des Wärmewiderstandes W für eine bestimmte mittlere Temperatur wenig sinnvoll, da W geometrieabhängig ist entsprechend

$$W = \Delta t_{eff} \frac{d \pi l}{Q}$$

$$\text{oder } W = \frac{\Delta t_{eff}}{\dot{q}}$$

W = Wärmewiderstand $\left[\frac{^{o}C\ cm^2}{W}; \right]$; Δt_{eff} = gemessene Temperaturdifferenz zwischen der Innen- und Aussenwand beim Wärmefluss $\dot{q}$ [W/cm^2] bzw. Q [W] ; l = Länge des Mehrschichtrohres; d = Durchmesser [cm] .

Die Angabe von W unter Benutzung eines mittleren Durchmessers

$$d_m = \frac{d_1 + d_4}{2}$$

d_1 = Innendurchmesser; d_4 = Aussendurchmesser des Mehrschichtrohres,

oder eines mittleren Wärmestromes

$$\dot{q}_m = \frac{\dot{q}_1 + \dot{q}_4}{2}$$

$\dot{q}_1$ = eintretender Wärmestrom an der Innenwand; $\dot{q}_2$ = austretende Wärmestrom an der Aussenwand,

würde ebenfalls keine vergleichbaren Wärmewiderstandswerte ergeben, da die elektrisch isolierende Metalloxydschicht i.a. nicht symmetrisch zwischen den beiden Metallschichten liegt. Weiter aussen liegende Isolierschichten führen zu kleineren Wärmewiderständen bei sonst gleichen Aussen- und Innendurchmessern des Mehrschichtrohres.
Auch die Angabe der Schichtdicken ohne Mitteilung der Durchmesser genügt nicht.
Es erscheint zweckmässig, als allgemeinen Kennwert das Temperaturdifferenzverhältnis m zu benutzen.

$$m = \frac{\Delta t_{eff}}{\Delta t_{th}}$$

Δt_{th} = theoretische Temperaturdifferenz zwischen Innen- und Aussenwand für den gleichen Wärmestrom, bei dem Δt_{eff} gemessen wurde.

Aus der Differenz von Δt_{eff} und Δt_{th} ergibt sich eine Temperaturdifferenz Δt_R, die charakteristisch für das Mehrschichtrohr ist.

$$\Delta t_R = \Delta t_{eff} - \Delta t_{th}$$

Bezogen auf den Wärmestrom folgt daraus ein Wärmeübergangswiderstand R.
Da zwei Übergangsschichten vorhanden sind, sei $\frac{R}{2} = R_{eff}$.

Vernachlässigt man die durch Wärmestrahlung übertragene Wärmemenge, dann wird:

$$R_{eff} = \frac{\Delta t_{eff}}{Q} \cdot \frac{\pi . l . (d_1 + d_3)}{4} - \frac{d_2 + d_3}{8} \left(\frac{\ln \frac{d_2}{d_1}}{\lambda_{Me_t}} + \frac{\ln \frac{d_3}{d_2}}{\lambda_{MeO_t}} + \frac{\ln \frac{d_4}{d_3}}{\lambda_{Me_t}} \right)$$

R_{eff} stellt den mittleren Wärmeübergangswiderstand für eine der beiden Metall-Keramik Übergangsschichten dar; d_2 = Innendurchmesser des Al_2O_3-Rohres; d_3 = Aussendurchmesser des Al_2O_3-Rohres; λ = Wärmeleitzahl des Metalles (Me) bzw. des Metalloxydes (MeO) bei der Temperatur t.

Der mittlere Wärmefluss ist bezogen auf $d_m = \frac{d_2 + d_3}{2}$

Der effektive Wärmeübergangswiderstand stellt auch ein Mass dar für die Abweichungen der erzielten thermischen Leitfähigkeiten von den Leitfähigkeiten für das massive Material der Schichten. Das tritt in Erscheinung zB. bei gesprühten Schichten. R_{eff} kann daher zur qualitativen Beurteilung eines Mehrschichtrohres herangezogen werden; beim idealen Mehrschichtrohr wäre es Null.
Diese Betrachtungen gelten nicht für solche Rohre, die mit Sinterprozessen aus Metalloxyd-Metallmischungen mit gleichbleibendem oder wechselndem Metalloxydgehalt hergestellt sind.

Um auch solche Rohre einzubeziehen, wäre es notwendig, Abmessungen für ein Standardrohr zu definieren und die gemessenen Temperaturdifferenzen auf dieses umzurechnen und für einen festgelegten Wärmefluss eine einheitliche mittlere Temperatur anzugeben.

Zur Angabe, wie hoch der statische Wärmefluss für eine Art von Mehrschichtrohren maximal sein kann, ohne dass eine Zerstörung und damit eine plötzliche Änderung der Eigenschaften, insbesondere des Isolationsverhaltens eintritt, soll der Grenzwärmefluss dienen $\dot{q}_{max}$.

Eine weitere Grösse ist der Isolationswiderstand ρ . Er ist messtechnisch leicht bei den gewünschten Temperaturen mit oder ohne gleichzeitigen Wärmefluss zu erfassen und stellt einen vergleichbaren Wert dar. Wo die Schichtdicke nicht genügend genau definiert ist, wird er in der Literatur (7) auch in $\Omega\,cm^2$ angegeben.

Eine Angabe über das Temperaturwechselverhalten soll zeigen, welche Temperaturwechsel beispielsweise das Mehrschichtrohr ausführen kann, ohne dabei seine Eigenschaften zu ändern. Das Temperaturwechselverhalten gibt jedoch nur qualitativ eine Aussage über die Temperaturwechselbeständigkeit eines Mehrschichtrohres, da die Art der Aufheizung sowie die Energiezu- und -abfuhr und deren Änderungen in der Zeiteinheit wie auch die Temperaturspanne und die Anzahl der Zyklen nur im Zusammenhang mit einem Projekt gegeben sind und untersucht werden können.
Zu den allgemeinen Eigenschaften gehört auch das Langzeitverhalten des Mehrschichtrohres unter betriebsähnlichen Bedingungen.

2.2 Technologische Eigenschaften

Für die endgültige Verwendung beim Bau eines bestimmten Thermionik-Reaktors ist die Ermittlung weiterer technologischer Eigenschaften bei instationären und stationären Betriebsbedingungen unerlässlich wie der Spannung, bei der in Cs-Atmosphäre Überschlag eintritt, der Biegefestigkeit, des Beschleunigungsverhaltens, sowie der Eigenschaftsänderungen im Reaktor.
Es wurde zB. festgestellt (15), dass sich in einem Neutronenspektrum mit Neutronenenergien grösser als 1 MeV

oberhalb einer integrierten Dosis von 2.3 . 10^{21} nvt in Lucalox (Al_2O_3) Mikrorisse bilden, die bei Anwesenheit einer Cs-Atmosphäre wahrscheinlich beschleunigt entstehen [16]. In einem unmoderierten Reaktor verträgt die Keramik möglicherweise nur 1.7 . 10^{21}nvt.

Der elektrische Widerstand nimmt unter dem Einfluss der Reaktorstrahlung bei Raumtemperatur stark ab. Bei einer Reaktorleistung von 6 kW/Liter beträgt die Abnahme etwa 5.10^2 Ωcm. Mit zunehmender Temperatur sinkt diese Abnahme auf kleine Werte im interessierenden Bereich von 700° - 800^oC [17]. Bei Temperaturen um 1000^oC, einer Reaktorleistung von 40 MW und Bestrahlungszeiten von 50 bis 250 Stunden weist Lucalox einen rund 5 mal kleineren elektrischen Widerstand auf als ausserhalb des Reaktors [18]. Diese günstig niedrigen Werte werden von gesprühten Schichten wegen gewisser Verunreinigungen wahrscheinlich nicht erreicht.

3. UNTERSUCHUNG VON MEHRSCHICHTROHREN

Die Untersuchung von Mehrschichtrohren verlangt viel personellen, apparativen und zeitlichen Aufwand. Alle Messungen bei erhöhter Temperatur müssen zur Vermeidung von Oxydation der Niob- bzw. Molybdänbauteile im Vakuum oder Schutzgas ausgeführt werden. Im Rahmen dieser zusammenfassenden Darstellung soll jedoch nicht auf die gebauten Messapparaturen im einzelnen eingegangen werden. Die Art und Reihenfolge der erforderlichen Untersuchungen, die der Ermittlung der Kenndaten und des Langzeitverhaltens dienen, sind in Tabelle 4 aufgeführt. Der hergestellte "Mehrschichtrohling" wird durch mechanische Bearbeitung auf die gewünschten Abmessungen gebracht. Mehrschichtrohre mit dicht gesintertem Keramikrohr als Isolator werden zunächst in axialer Richtung mit He auf Dichtigkeit geprüft. Eine Ultraschalluntersuchung schliesst sich an, die die Ergebnisse bestätigt und darüber hinaus Auskunft gibt, wie die Metall-Keramikbindung verteilt ist.

Die Figuren 1 bis 3 zeigen die Ergebnisse von Ultraschalluntersuchungen an einem Mehrschichtrohr mit guter Bindung, mit teilweiser Bindung und ohne Bindung. Ein Mehrschichtrohr mit guter Bindung ist im Querschnitt abgebildet in Figur 4. Zur Erhöhung des Kontrastes ist es seitlich etwas geneigt. Figur 5 zeigt in 1000-facher Vergrösserung die perfekte Bindung von Nb1Zr und Al_2O_3.
Bei der Herstellung entstandene Risse, sie verlaufen in radialer Richtung, werden mit dem Mikroskop nachgewiesen. Es folgt ein Spannungstest zur Sicherstellung, dass sich keine elektrisch leitende Brücke gebildet hat. Zur Ermittlung der Kennzahlen wird der mit Thermoelementen ausgestattete Probekörper in eine Zelle eingebracht, die die Möglichkeit bietet, bei verschiedenen Wärmeflüssen und verschiedenen mittleren Probentemperaturen die auftretende Temperaturdifferenz zu messen. R_{eff} wird rechnerisch aus den Messdaten ermittelt. Bei einzelnen, nach statistischen Gesichtspunkten ausgewählten Proben wird der maximale Wärmefluss gemessen, wobei die Probe zerstört wird. Die übrigen Proben werden nach dem jeder Untersuchung folgenden Ultraschalltest in einer automatisch arbeitenden Apparatur thermischen Zyklen zwischen 500° und 1000°C unterworfen. Zur Zeit erfolgt die Aufheizung mit RF von aussen. Eine Umstellung auf Innenbeheizung mit einem Strahlenheizer ist in Vorbereitung.
Beim Betriebstest wird jeweils eine Probe in eine Testzelle eingebaut und den gewünschten Betriebsbedingungen unterworfen, zB. 750°C mittlere Probentemperatur, einem Wärmefluss von 60 W/cm^2 und einer angelegten Gleichspannung von 150 V. Mehrere solcher Testzellen sind in einem Vakuumsystem zusammengefasst. Die Anlage ist für Langzeitversuche von einigen 1000 Stunden geeignet. Nach einem weiteren Ultraschalltest können die geprüften Mehrschichtrohre technologischen Untersuchungen, einschliesslich Untersuchungen im Reaktorstrahlenfeld, unterworfen werden.

4. SCHLUSSBEMERKUNG

Die Herstellung und Untersuchung von Mehrschichtrohren erfordert erhebliche Mittel finanzieller, personeller und apparativer Art. Insbesondere müssen Mehrschichtrohre in hinreichend grosser Stückzahl nach verschiedenen Verfahren hergestellt werden können zur Auswahl der besten Verfahren. Gleichzeitig müssen weitere Testanlagen entwickelt und gebaut werden, wenn in absehbarer Zeit zuverlässige Mehrschichtrohre für geförderte Projekte wie das ITR-Projekt zur Verfügung stehen sollen. Es muss darauf hingewiesen werden, dass Eigenschaftsmessungen unter Bestrahlung und nach Reaktorbestrahlung von entscheidender Wichtigkeit sind, um endgültige Aussagen machen zu können über die Qualität von Mehrschichtrohren zusammen mit ihren Herstellungsverfahren; aber diese letzteren Arbeiten konnten in Ispra noch nicht begonnen werden.

ANERKENNUNG

Der Autor dankt den Herren Dr. S. FINZI, Leiter des Departement Engineering und der Abteilung Technologie sowie Herrn Dr. H. NEU, Leiter der Abteilung Conversion Directe, für die Unterstützung dieser Arbeit.

LITERATURHINWEISE

(1) H. ANDRAE, F. BUDNICK, F. GROSS, W. JAHNS, K. JANNER, A. JESTER "The Incore Thermionic Reactor as a Space Power Source", Second Int. Conf. on Thermionic Electrical Power Generation, Stresa (Italia) 27-31 May, 1968

(2) C.D. SAWYER, P.R. HILL, D.R. WILKINS "Multimegawatt Thermionic Reactor Systems for Space Application", Second Int. Conf. on Thermionic Electrical Power Generation, Stresa (Italia), 27-31 May 1968

(3) W.A. RANKEN, E.W. SALMI, "Thermionic Electrical Propulsion System Characteristics and Capabilities", Second Int. Conf. on Thermionic Electrical Power Generation, Stresa (Italia), 27-31 May 1968

(4) W.E. LOEWE, "Out-of-Core Thermionic Space Power", Second Int. Conf. on Thermionic Electrical Power Generation, Stresa (Italia), 27-31 May 1968

(5) P. FIEBELMANN, H. NEU, C. RINALDINI, "A Heat Pipe Thermionic Reactor Concept", Second Int. Conf. on Thermionic Electrical Power Generation, Stresa (Italia), 27-31 May 1968

(6) Mitteilung der Firma San Fernando Laboratories, Pacoima, California, USA

(7) M. PEEHS, H. SCHÖRNER, H. STEHLE, "A Special Technique for Manufacturing Insulating Collector Multilayer Tubes", Second Int. Conf. on Thermionic Electrical Power Generation, Stresa (Italia), 27-31 May 1968

(8) R.G. BELYANINA et al. "Insulating Materials of Thermoemission Converters", Second Int. Conf. on Thermionic Electrical Power Generation, Stresa (Italia), 27-31 May 1968

(9) Arbeitsergebnisse aus EURATOM Forschungsvertrag 022 66-4 Cod D mit der Feldmühle AG, Plochingen

(10) Mündliche Mitteilung

(11) H. VENKER "Versuche zum Plattieren von Uran und Aluminium mit Niob", EUR 2111 - d, 1964

(12) P. FIEBELMANN, "Fabrication and Properties of Chemical Vapor Deposited Nb Layers on Al_2O_3 Bodies for Thermionic Application", EUR 3743 - e, 1968

(13) E.S.A. ARKIN, S.F. KUKUSHKIN, H.A. MURINSON, B.G. OGLOBLIN, P.Z. CHEREPANOV, V.S. CHEKHOVICH, "Thermal Resistance of Multilayer Cylindrical Elements in the Thermionic Converters", Second Int. Conf. on Thermionic Electrical Power Generation, Stresa (Italia), 27-31 May 1968

(14) Yu.I. DANILOV, V.K. KOSHKIN, T.V. MIKHAILOVA, Yu.S. MIKHEEV, S.A. ORLIN, "Thermal Contact Resistance in Cylindrical Elements in Thermionic Energy Converters",

Second Int. Conf. on Thermionic Electrical Power Generation, Stresa (Italia), 27-31 May 1968

(15) G.W. KEILHOLTZ, R.E. MOORE, "Irradiation Damage to Aluminium Oxide Exposed to 5 x 10^{21} Fast Neutrons/cm^2", Nuc. Appl. 3, (1967) 686

(16) J.K. HIGGINS "Reaction of Alumina with Cesium Vapour", AERE - R 4781 (1964)

(17) W.B. HAIDLER, "A Study of the Electrical Conductivity of Alumina at High Temperatures and in a Radiation Field", Ph. D. Dissertation, The University of Arizona, Tucson, Arizona (1964)

(18) S.H. SHEPARD, "Research Program for the Long Term Testing of Cylindrical Diodes and the Irradiation of Fuel and Insulator", 17 Sept. 1964, GEST 2039/NASA CR-54267

Tabelle 1

Erforderliche Mehrschichtrohre für bestehende Konzepte oder Projekte

Projekt oder Konzept Firmengruppe	Durchmesser (mm) Werkstoff Wandstärke (mm)	Länge der Zelle (mm)	Betriebs-temperatur (°C)	Wärmefluss (W/cm²)	Betriebs-spannung (V)	Position	Lit
ITR BBC-Siemens Interatom	27.5/20.5 Nb1Zr/Al_2O_3/Nb 1.0/0.2/2.3	60	700	50	----	im Reaktor	(1)
Multimegawatt General Electric	15.24/12.2 Kovar/Al_2O_3/Nb 0.58/0.58/0.58	32	700 (800) 1)	67 (85) 1)	26	im Reaktor	(2)
---- Los Alamos Sc. Laboratory	--/13 Nb1Zr/Al_2O_3/-	55 2)	750	92	----	im Reaktor	(3)
---- Laurence Radiation Laboratory	---- W/BeO/W ----	----	----	400	400	ausserhalb des Reaktors	(4)
HPTR-L Euratom-Ispra	49.6/45.4 Nb1Zr/Al_2O_3/Nb1Zr 1.0/0.5/0.6	35	750	60	40	ausserhalb des Reaktors	(5)

1) Advanced Project

2) geschätzt

Tabelle 2

Qualitative Übersicht über Mehrschichtrohre hergestellt nach verschiedenen Verfahren

Herstellungsverfahren Firma bzw. Labor	Herstellungslänge (mm)	Material u. Art der Schichten			Isolierschichtdicke (mm)	Isolationswiderstand örtlich	Lit
		Isolierung	Metallschichten	Übergangsschichten			
CVD-Prozess SFL 1)	beliebig	Al_2O_3 CVD	Nb massiv oder CVD	keine	0.127+ 0.254	variabel	(6)
Plasmaspray-Aufziehverfahren Siemens	beliebig	Al_2O_3 Spray-schicht	Nb massiv	CuNiCr Spray-schicht	0.2 - 0.3 bevorzugt	variabel 2)	(7)
Oxydgehaltkontrolliertes Cermet Sinterverfahren Obninsk, USSR Feldmühle 3)	beliebig	Al_2O_3 oder BeO 100% Oxydsinter-schicht		Nb-Cermet Mo-Cermet 0-100% Metall aussen	beliebig dünn	variabel	(8) (9)
Giessverfahren RCA	----	Al_2O_3 gegossen	Mo massiv	keine	0.05	konstant 2)	(10)
Zylinderlötverfahren Euratom Ispra	beschränkt ≤ 150	Al_2O_3	Nb 1 Zr massiv	Cu Ni	(0.2),0.5+1	konstant	
Zylinderdrucklötverfahren Euratom Ispra 4)	beschränkt ≤ 150	Al_2O_3	Nb 1 Zr massiv	Cu Ni	(0.2),0.5+1	konstant	
Isostatisches Heisspressen Euratom Ispra 4)	beschränkt ≤ 150	Al_2O_3	Nb 1 Zr massiv	keine	(0.2),0.5+1	konstant	
Elektrolytische Verstärkung Euratom Ispra 5)	beschränkt ≤ 150	Al_2O_3	Nb(Nb1Zr) massiv	----	0.2,0.5+1	konstant	
Unbekanntes Verfahren TEECO	----	Al_2O_3	Nb massiv	----	----	konstant	

1) hergestellt im Auftrag für Euratom Ispra

2) wird angenommen auf Grund der Herstellungsweise

3) EUR-COD-Contract

4) Proben im K.F.Z. Karlsruhe isostatisch heissgepresst im Auftrag für Euratom Ispra

5) Proben bei Union Carbide USA im Auftrag elektrolytisch verstärkt

Tabelle 3

Kenndaten für Mehrschichtrohre

Bezeichnung	Symbol	Einheit
Temperaturdifferenzverhältnis bei 700°C mittlerer Metalloxydtemperatur	$m = \frac{\Delta t_{eff}}{\Delta t_{th}}$	
Wärmeübergangswiderstand in einer Übergangsschicht Metall - Metalloxyd	R_{eff}	$\frac{°C\ cm^2}{W}$
Grenzwärmefluss bei 700°C 1)	$\dot{q}_{max}$	W/cm^2
Isolationsstärke	s	cm
Isolationswiderstand 1)	ρ	Ω cm
20°C		$\Omega\ cm^2$ 2)
700°C		
800°C		
Temperaturwechselverhalten Änderung der Eigenschaften nach 1000 Temperaturwechseln zwischen 500 und 1000°C bei u Minuten Aufheiz- und v Minuten Abkühlzeit		

1) mittlere Keramiktemperatur

2) wenn s nicht definiert ist

Tabelle 4

Untersuchung von Mehrschichtrohren

Reihenfolge der Untersuchungen	Bemerkungen
Axialer Dichtigkeitstest	He
Ultraschalltest	
Mikroskopische Untersuchung	Feststellung von Rissen im Isolierkörper
Spannungstest	Bis zu 2 kV bei RT
Wärmeflussmessungen	Kennzahlen: m, R_{eff}, $\dot{q}_{max}$ Temperaturbereich 200 ÷ 800°C
Ultraschalltest	
Temperaturwechselverhalten	500° - 1000°C
Ultraschalltest	
Betriebstest	Als Kurzzeit- und Langzeittest bei Temperaturen 500 bis 800°C, einem Wärmefluss, $q < 100$ W/cm^2 und angelegter Spannung mit oder ohne Cs-Atmosphäre. Messung des elektrischen Widerstandes.
Ultraschalltest	
Mikroskopische Untersuchung von Quer- und Längsschnitten	Statistische Untersuchung
Technologische Untersuchungen	

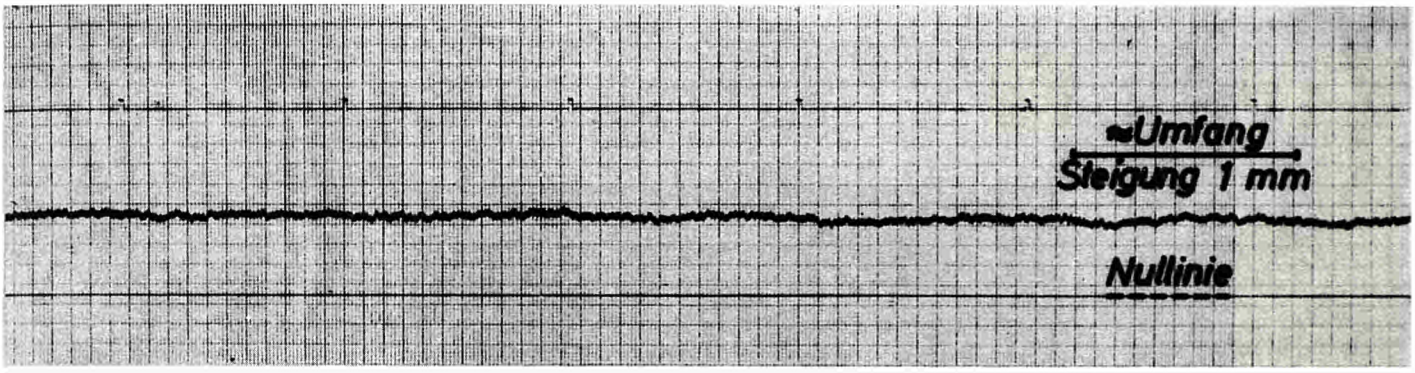


Fig. 1 Ultraschalldiagramm eines NbIZr-Al_2O_3 Mehrschichtrohres mit guter Bindung zwischen den Grenzflächen von Metall und Metalloxyd

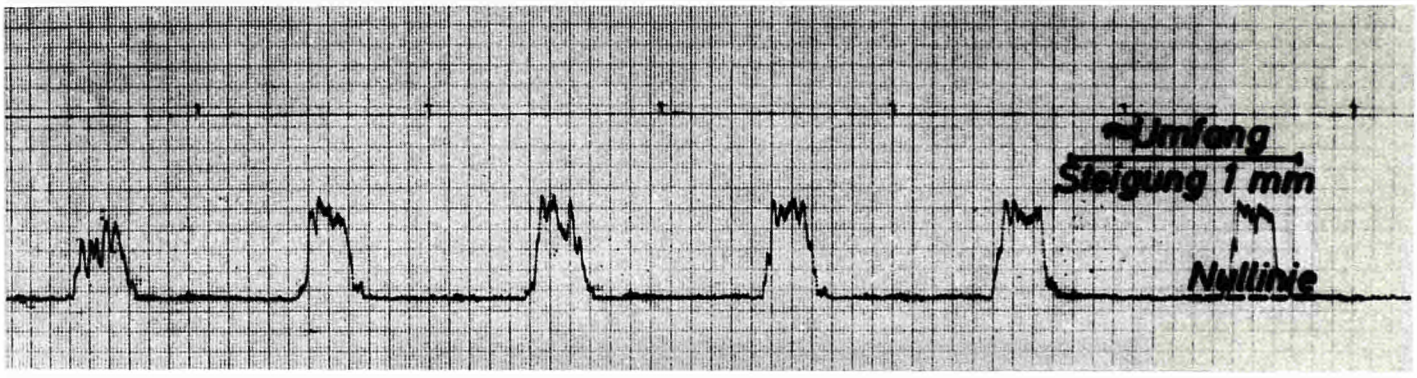


Fig. 2 Ultraschalldiagramm eines NbIZr-Al_2O_3 Mehrschichtrohres mit teilweiser Bindung zwischen den Grenzflächen von Metall und Metalloxyd

Fig. 3 Ultraschalldiagramm eines NbIZr-Al_2O_3 Mehrschichtrohres ohne Bindung zwischen den Grenzflächen von Metall und Metalloxyd

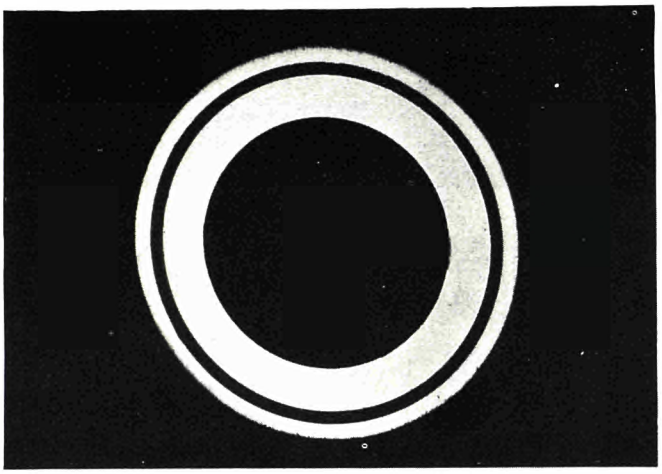
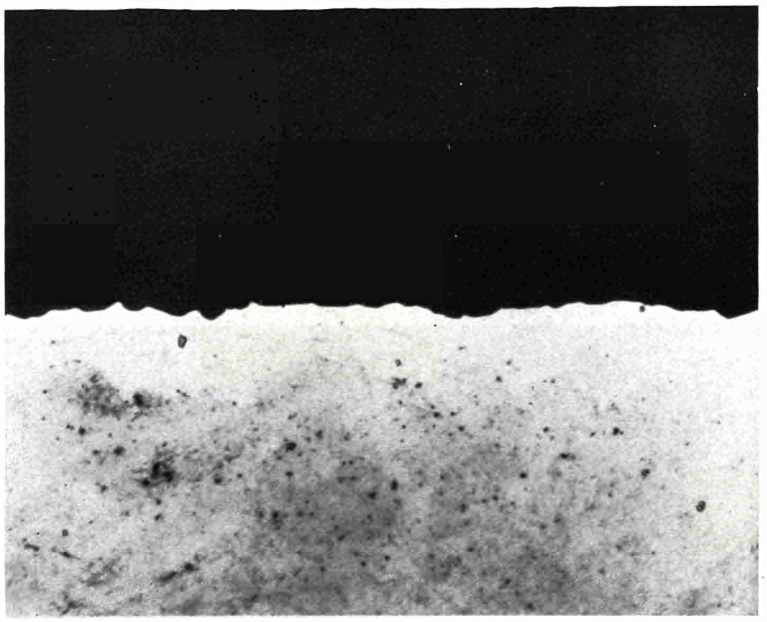


Fig.4 Nb1Zr-Al_2O_3-Nb1Zr
Mehrschichtrohr isostatisch
heissgepresst
Ø18/11x35mm, 0.5 mm Al_2O_3



Al_2O_3

Nb1Zr

1000x

Fig.5 Grenzschicht Nb1Zr-Al_2O_3
des Mehrschichtrohres
Fig. 4

EUR 4239.d

C O R R I G E N D U M

HERSTELLUNGSVERFAHREN UND UNTERSUCHUNG VON MEHRSCHICHTROHREN FÜR THERMIONIK-KONVERTER

Übersicht und jetziger Stand

von

P. FIEBELMANN

Auf Seite 10 wurde irrtümlich ein falscher Index eingesetzt. In der Beziehung für R_{eff} muß der erste Klammerausdruck heißen:

$$(d_2 + d_3)$$

AN UNSERE LESER

Alle Euratom-Berichte werden nach Erscheinen in der von der Zentralstelle für Information und Dokumentation (CID) herausgegebenen Monatszeitschrift **EURATOM INFORMATION** angezeigt. Abonnements (1 Jahr : DM 60) und Probehefte sind erhältlich bei :

Handelsblatt GmbH
"Euratom Information"
Postfach 1102
D-4 Düsseldorf (Deutschland)

oder

Office central de vente des publications
des Communautés européennes
2, Place de Metz
Luxembourg

Erkenntnisse verbreiten ist soviel wie Wohlstand verbreiten — ich meine den allgemeinen Wohlstand, nicht den individuellen Reichtum — denn mit dem Wohlstand verschwindet mehr und mehr das Böse, das uns aus dunkler Zeit vererbt ist.

Alfred Nobel

VERTRIEBSSTELLEN

Alle Euratom-Berichte sind bei folgenden Stellen zu den auf der ersten Rückseite des Umschlags angegebenen Preisen erhältlich (bei schriftlicher Bestellung bitte die EUR-Nummer und den Titel, die beide auf der ersten Umschlagsseite jedes Bericht stehen, deutlich angeben).

OFFICE CENTRAL DE VENTE DES PUBLICATIONS DES COMMUNAUTES EUROPEENNES
2, place de Metz, Luxembourg (Compte chèque postal N° 191-90)

BELGIQUE — BELGIË
MONITEUR BELGE
40-42, rue de Louvain - Bruxelles
BELGISCH STAATSBLAD
Leuvenseweg 40-42, - Brussel

DEUTSCHLAND
BUNDESANZEIGER
Postfach - Köln 1

FRANCE
SERVICE DE VENTE EN FRANCE DES PUBLICATIONS DES COMMUNAUTES EUROPEENNES
26, rue Desaix - Paris 15e

ITALIA
LIBRERIA DELLO STATO
Piazza G. Verdi, 10 - Roma

LUXEMBOURG
OFFICE CENTRAL DE VENTE DES PUBLICATIONS DES COMMUNAUTES EUROPEENNES
9, rue Goethe - Luxembourg

NEDERLAND
STAATSDRUKKERIJ
Christoffel Plantijnstraat - Den Haag

UNITED KINGDOM
H. M. STATIONERY OFFICE
P. O. Box 569 - London S.E.1

EURATOM — C.I.D.
51-53, rue Belliard
Bruxelles (Belgique)

CDNA04239DEC