

EUR 2775.d

ASSOZIATION

Europäische Atomgemeinschaft - EURATOM/
Brown Boveri/Krupp Reaktorbau GmbH, Düsseldorf/
Kernforschungsanlage Jülich des Landes Nordrhein Westfalen e.V.

BAU EINER APPARATUR ZUR BESTIMMUNG
DER WÄRMELEITFÄHIGKEIT VON HARTKOHLE
(KOHLESTEIN) UNTER GASATMOSPHERE
IM DRUCKBEREICH VON 0 - 15 ATÜ UND
BEI TEMPERATUREN BIS 250 °C

von

J. LANGEN und R. HECKER

1966



THTR 5

Bericht abgefasst bei der
KFA - Kernforschungsanlage Jülich des Landes Nordrhein Westfalen e.V.
Jülich, Deutschland

Assoziation Nr. 003-63-1 RGAD

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 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 Guyot, s.a.
Brüssel, Mai 1966

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

EUR 2775.d

BAU EINER APPARATUR ZUR BESTIMMUNG DER WÄRMELEITFÄHIGKEIT VON HARTKOHLE (KOHLESTEIN) UNTER GASATMOSPHERE IM DRUCKBEREICH VON 0-15 ATÜ UND BEI TEMPERATUREN BIS 250 °C von J. LANGEN und R. HECKER

Assoziation : Europäische Atomgemeinschaft - EURATOM/
Brown Boveri/ Krupp Reaktorbau GmbH, Düsseldorf/
Kernforschungsanlage Jülich des Landes Nordrhein-Westfalen e.V.
Bericht THTR 5 abgefasst bei der KFA - Kernforschungsanlage Jülich des Landes Nordrhein-Westfalen e.V., Jülich (Deutschland)
Assoziation Nr. 003-63-1 RGAD
Brüssel, Mai 1966 - 20 Seiten - 4 Abbildungen - FB 40

Ein interessantes Konstruktionsmaterial für Hochtemperaturreaktoren stellt die sogenannte Hartkohle dar. Die Wärmeleitfähigkeit eines solchen Steines ist stark von den Komponenten, dem Herstellungsverfahren und wegen der starken Porosität von den Betriebsbedingungen wie Gasart, Gasdruck und Temperatur abhängig.

Von besonderem Interesse war die Wärmeleitfähigkeit bei Temperaturen bis 400 °C und einem Gasdruck bis 40 atü.

EUR 2775.d

CONSTRUCTION OF APPARATUS FOR DETERMINATION OF THERMAL CONDUCTIVITY OF COAL STONES IN GAS AT PRESSURES IN THE 0-15 ATMOSPHERE RANGE AND AT TEMPERATURES UP TO 250 °C by J. LANGEN and R. HECKER

Association : European Atomic Energy Community - EURATOM/
Brown Boveri/ Krupp Reaktorbau GmbH, Düsseldorf/
Kernforschungsanlage Jülich des Landes Nordrhein-Westfalen e.V.
Report THTR 5 prepared at KFA - Kernforschungsanlage Jülich des Landes Nordrhein-Westfalen e.V., Jülich (Germany)
Association No. 003-63-1 RGAD
Brussels, May 1966 - 20 Pages - 4 Figures - FB 40

An interesting building material for a high-temperature reactor are the so-called coal stones. The thermal conductivity of these articles mainly depends on their ingredients, progress of manufacturing and because of the high porosity on the reactor conditions as gas kind, gas pressure, and temperature.

The thermal conductivity at a temperature up to 400 °C and at a gas pressure

EUR 2775.d

CONSTRUCTION OF APPARATUS FOR DETERMINATION OF THERMAL CONDUCTIVITY OF COAL STONES IN GAS AT PRESSURES IN THE 0-15 ATMOSPHERE RANGE AND AT TEMPERATURES UP TO 250 °C by J. LANGEN and R. HECKER

Association : European Atomic Energy Community - EURATOM/
Brown Boveri/ Krupp Reaktorbau GmbH, Düsseldorf/
Kernforschungsanlage Jülich des Landes Nordrhein-Westfalen e.V.
Report THTR 5 prepared at KFA - Kernforschungsanlage Jülich des Landes Nordrhein-Westfalen e.V., Jülich (Germany)
Association No. 003-63-1 RGAD
Brussels, May 1966 - 20 Pages - 4 Figures - FB 40

An interesting building material for a high-temperature reactor are the so-called coal stones. The thermal conductivity of these articles mainly depends on their ingredients, progress of manufacturing and because of the high porosity on the reactor conditions as gas kind, gas pressure, and temperature.

The thermal conductivity at a temperature up to 400 °C and at a gas pressure

EUR 2775.d

CONSTRUCTION OF APPARATUS FOR DETERMINATION OF THERMAL CONDUCTIVITY OF COAL STONES IN GAS AT PRESSURES IN THE 0-15 ATMOSPHERE RANGE AND AT TEMPERATURES UP TO 250 °C by J. LANGEN and R. HECKER

Association : European Atomic Energy Community - EURATOM/
Brown Boveri/ Krupp Reaktorbau GmbH, Düsseldorf/
Kernforschungsanlage Jülich des Landes Nordrhein-Westfalen e.V.
Report THTR 5 prepared at KFA - Kernforschungsanlage Jülich des Landes Nordrhein-Westfalen e.V., Jülich (Germany)
Association No. 003-63-1 RGAD
Brussels, May 1966 - 20 Pages - 4 Figures - FB 40

An interesting building material for a high-temperature reactor are the so-called coal stones. The thermal conductivity of these articles mainly depends on their ingredients, progress of manufacturing and because of the high porosity on the reactor conditions as gas kind, gas pressure, and temperature.

The thermal conductivity at a temperature up to 400 °C and at a gas pressure

Da genaue Werte über diese Abhängigkeit aus der Literatur nicht zu entnehmen sind, wurde ein Versuchsprogramm zur experimentellen Ermittlung der interessierenden Werte aufgestellt.

Verschiedene stationäre und dynamische Verfahren wurden auf ihre Eignung und die zu erwartende Meßgenauigkeit hin kritisch untersucht. Von allen Verfahren ließ das „Radialmeßverfahren“ bei relativ geringem Aufwand optimale Meßergebnisse erwarten.

Es wurde ein Prüfbehälter in Form eines doppelwandigen, wassergekühlten Stahlzylinders von 130 mm Innendurchmesser konstruiert und gebaut. Als Probe wurde ein zylindrischer Hartkohlestab verwendet, der zentrisch durch eine Heizpatrone erwärmt wurde. Die Probe hatte einen Außendurchmesser von 60 mm und eine Länge von 200 mm. An verschiedenen Radien wurden in Bohrungen parallel zur Hauptachse Thermolemente zur Messung der Temperatur eingebohrt. Die Wärmeleitfähigkeit wurde nach der Formel

$$\lambda = \frac{Q \cdot \ln r_a/r_i}{2\pi l \cdot (\vartheta_i - \vartheta_a)} \left[\frac{\text{kcal}}{\text{mh}^\circ\text{C}} \right]$$

ermittelt.

Es zeigte sich, daß bei Temperaturen unter 200 °C die Wärmeleitfähigkeit bei Luft und Helium (1-15 atü) unterschiedlich stark ansteigt und bei ca. 200 °C mit etwa 9 kcal/mh°C einen annähernd gleichen Wert erreicht. Diesen Meßergebnissen kommt jedoch bei dem starken Eigenfehler der Apparatur nur eine qualitative Bedeutung zu. Genauere Aussagen werden erst nach Umbau der Einrichtung möglich sein.

up to 40 kp/cm² was of particular interest.

A program was made to find out the interesting values, since the exact values could not be taken from literature.

Different stationary and dynamic methods have been inquired with regard to their suitability and to the expectable accuracy. From all methods left the method with radial heat-flow at little expense optimal results to be expected.

A test box was constructed and built in form of a double walled water-cooled steel cylinder with an inner diameter of 130 mm. A cylindric coal stone bar was applied as sample which was heated by a central situated heating bar. The sample had 60 mm in diameter and a length of 200 mm. At different radii holes were made parallel to the main axis to put in thermocouples to measure temperatures. The thermal conductivity was found by the following formula :

$$\lambda = \frac{Q \cdot \ln r_a/r_i}{2\pi l \cdot (\vartheta_i - \vartheta_a)} \left[\frac{\text{kcal}}{\text{mh}^\circ\text{C}} \right]$$

It could be seen that the thermal conductivity at a temperature below 200 °C — sample in air or helium at a pressure of 1-15 kp/cm² — had a different increase, but at 200 °C it received with 9 kcal/mh°C nearly the same value.

However, these measuring results are only of a qualitative importance with regard to the heavy initial defect of the apparatus. More detailed statements will be possible after the installation has been changed.

up to 40 kp/cm² was of particular interest.

A program was made to find out the interesting values, since the exact values could not be taken from literature.

Different stationary and dynamic methods have been inquired with regard to their suitability and to the expectable accuracy. From all methods left the method with radial heat-flow at little expense optimal results to be expected.

A test box was constructed and built in form of a double walled water-cooled steel cylinder with an inner diameter of 130 mm. A cylindric coal stone bar was applied as sample which was heated by a central situated heating bar. The sample had 60 mm in diameter and a length of 200 mm. At different radii holes were made parallel to the main axis to put in thermocouples to measure temperatures. The thermal conductivity was found by the following formula :

$$\lambda = \frac{Q \cdot \ln r_a/r_i}{2\pi l \cdot (\vartheta_i - \vartheta_a)} \left[\frac{\text{kcal}}{\text{mh}^\circ\text{C}} \right]$$

It could be seen that the thermal conductivity at a temperature below 200 °C — sample in air or helium at a pressure of 1-15 kp/cm² — had a different increase, but at 200 °C it received with 9 kcal/mh°C nearly the same value.

However, these measuring results are only of a qualitative importance with regard to the heavy initial defect of the apparatus. More detailed statements will be possible after the installation has been changed.

up to 40 kp/cm² was of particular interest.

A program was made to find out the interesting values, since the exact values could not be taken from literature.

Different stationary and dynamic methods have been inquired with regard to their suitability and to the expectable accuracy. From all methods left the method with radial heat-flow at little expense optimal results to be expected.

A test box was constructed and built in form of a double walled water-cooled steel cylinder with an inner diameter of 130 mm. A cylindric coal stone bar was applied as sample which was heated by a central situated heating bar. The sample had 60 mm in diameter and a length of 200 mm. At different radii holes were made parallel to the main axis to put in thermocouples to measure temperatures. The thermal conductivity was found by the following formula :

$$\lambda = \frac{Q \cdot \ln r_a/r_i}{2\pi l \cdot (\vartheta_i - \vartheta_a)} \left[\frac{\text{kcal}}{\text{mh}^\circ\text{C}} \right]$$

It could be seen that the thermal conductivity at a temperature below 200 °C — sample in air or helium at a pressure of 1-15 kp/cm² — had a different increase, but at 200 °C it received with 9 kcal/mh°C nearly the same value.

However, these measuring results are only of a qualitative importance with regard to the heavy initial defect of the apparatus. More detailed statements will be possible after the installation has been changed.

EUR 2775.d

ASSOZIATION

Europäische Atomgemeinschaft - EURATOM/
Brown Boveri/Krupp Reaktorbau GmbH, Düsseldorf/
Kernforschungsanlage Jülich des Landes Nordrhein Westfalen e.V.

BAU EINER APPARATUR ZUR BESTIMMUNG
DER WÄRMELEITFÄHIGKEIT VON HARTKOHLE
(KOHLESTEIN) UNTER GASATMOSPHERE
IM DRUCKBEREICH VON 0 - 15 ATÜ UND
BEI TEMPERATUREN BIS 250 °C

von

J. LANGEN und R. HECKER

1966



T H T R 5

Bericht abgefasst bei der
KFA - Kernforschungsanlage Jülich des Landes Nordrhein Westfalen e.V.
Jülich, Deutschland

Assoziation Nr. 003-63-1 RGAD

I N H A L T

1 —	EINLEITUNG UND AUFGABENSTELLUNG	3
2 —	THEORETISCHER TEIL	4
	2.1 Allgemeine Grundlagen	4
	2.2 Möglichkeiten zur Messung der Wärmeleitfähigkeit unter Gasatmosphäre	5
	2.2.1 Stationäre Verfahren	6
	2.2.2 Dynamische Verfahren	13
	2.3 Auswahl einer Möglichkeit	15
3 —	VERSUCHSAUFBAU	15
	3.1 Beschreibung der Versuchsanordnung	15
4 —	PRAKTISCHER TEIL	16
	4.1 Ablauf der Versuche	16
	4.2 Auswertung der Ergebnisse	17
5 —	VORLÄUFIGE MESSERGEBNISSE	18
6 —	LITERATURNACHWEIS	20

ZUSAMMENFASSUNG

Ein interessantes Konstruktionsmaterial für Hochtemperaturreaktoren stellt die sogenannte Hartkohle dar. Die Wärmeleitfähigkeit eines solchen Steines ist stark von den Komponenten, dem Herstellungsverfahren und wegen der starken Porosität von den Betriebsbedingungen wie Gasart, Gasdruck und Temperatur abhängig.

Von besonderem Interesse war die Wärmeleitfähigkeit bei Temperaturen bis 400 °C und einem Gasdruck bis 40 atü.

Da genaue Werte über diese Abhängigkeit aus der Literatur nicht zu entnehmen sind, wurde ein Versuchsprogramm zur experimentellen Ermittlung der interessierenden Werte aufgestellt.

Verschiedene stationäre und dynamische Verfahren wurden auf ihre Eignung und die zu erwartende Meßgenauigkeit hin kritisch untersucht. Von allen Verfahren ließ das „Radialmeßverfahren“ bei relativ geringem Aufwand optimale Meßergebnisse erwarten.

Es wurde ein Prüfbehälter in Form eines doppelwandigen, wassergekühlten Stahlzylinders von 130 mm Innendurchmesser konstruiert und gebaut. Als Probe wurde ein zylindrischer Hartkohlestab verwendet, der zentrisch durch eine Heizpatrone erwärmt wurde. Die Probe hatte einen Außendurchmesser von 60 mm und eine Länge von 200 mm. An verschiedenen Radien wurden in Bohrungen parallel zur Hauptachse Thermoelemente zur Messung der Temperatur eingebohrt. Die Wärmeleitfähigkeit wurde nach der Formel

$$\lambda = \frac{Q \cdot \ln r_a/r_i}{2\pi l \cdot (\vartheta_i - \vartheta_a)} \quad \left[\frac{\text{kcal}}{\text{mh}^\circ\text{C}} \right]$$

ermittelt.

Es zeigte sich, daß bei Temperaturen unter 200 °C die Wärmeleitfähigkeit bei Luft und Helium (1-15 atü) unterschiedlich stark ansteigt und bei ca. 200 °C mit etwa 9 kcal/mh°C einen annähernd gleichen Wert erreicht. Diesen Meßergebnissen kommt jedoch bei dem starken Eigenfehler der Apparatur nur eine qualitative Bedeutung zu. Genauere Aussagen werden erst nach Umbau der Einrichtung möglich sein.

1. Einleitung und Aufgabenstellung

Ein interessantes Konstruktionsmaterial für einen Hochtemperaturreaktor ist die Hartkohle; eine Vorstufe des Graphits.

Die Eigenschaften dieser Hartkohle lassen sie als Konstruktionsmaterial für einen Reaktor, wie er im Rahmen des THTR-Projektes geplant wird, besonders geeignet erscheinen. Es ist z.B. daran gedacht, den Raum zwischen Reflektor und Liner in einem solchen Reaktor, der in einem Spannbetonbehälter untergebracht ist, mit Kohlestein auszufüllen. Die Hartkohle würde dann auch die Funktion einer Wärmeisolierung zwischen Core und Spannbetonbehälter haben. Da aber speziell die Wärmeleitfähigkeit dieses Steins stark vom Herstellungsverfahren abhängt, sind genaue Angaben aus der Literatur nicht zu entnehmen. Deshalb sollen die zur Feststellung der Wärmeleitfähigkeit erforderlichen Versuche unter besonderer Berücksichtigung der tatsächlichen Verhältnisse im Betrieb (Gasatmosphäre) bei verschiedenen Drücken und Temperaturen im Institut für Reaktorentwicklung durchgeführt werden.

Es soll also die Wärmeleitfähigkeit einer porösen Graphitkohle im Temperaturbereich zwischen 20°C und 250°C gemessen werden. Als Gase sollen Helium und CO_2 verwendet werden, wobei der maximale Meßdruck nach den Bestimmungen des TÜV bei dem konstruierten Druckbehälter nicht mehr als 15 atü betragen darf. Bei der Konstruktion des Druckbehälters soll eingeplant werden, daß auch noch Messungen an losen Coated-Particles-Schüttungen durchgeführt werden sollen.

Manuskript erhalten am 7. März 1966.

2. Theoretischer Teil

2.1 Allgemeine Grundlagen

Bei der Behandlung von Wärmeleitungsproblemen betrachtet man die Körper grundsätzlich als Kontinuum, d.h. die atomar bzw. molekular aufgebaute Materie wird ersetzt durch eine isotope und homogene Materie. In einem solchen homogenen Körper kann dann auch eine punktförmige Verteilung der Temperatur angenommen werden. Die Gesamtheit aller Temperaturwerte liefert ein Temperaturfeld und ist damit eine Funktion von Ort und Zeit.

$$\theta = f(x; y; z; t)$$

Die Orte gleicher Temperatur bilden isotherme Flächen. Senkrecht zu diesen Flächen ist die Temperaturänderung am größten. Dieses Gefälle wird als "Temperaturgradient" bezeichnet.

$$\text{grad } \theta = \frac{d\theta}{dn} \quad (\text{Grad/m})$$

Die Normalen auf den Isothermen werden als Wärmestromlinien bezeichnet. Die Größe des Wärmestromes pro Zeit und Flächeneinheit ist dem Temperaturgradienten proportional.

$$dq = - \lambda \frac{d\theta}{dn} \quad (\text{kcal/m}^2\text{h})$$

Der Proportionalitätsfaktor " λ " (Wärmeleitfähigkeit) hat die Dimension kcal/m.h.^{°C}.

Nach Fourier gilt für die transportierte Wärmemenge

$$dq = - \lambda \frac{d\theta}{dn} \cdot dF \quad (\text{kcal/h})$$

Durch Integration ergibt sich

$$Q = - \lambda \cdot F (\theta_2 - \theta_1) \quad (\theta_1 > \theta_2)$$

Diese Gleichung reicht lediglich zur Berechnung des Wärmedurchgangs, nicht aber zur Berechnung der Temperaturfelder aus. Es muß daher eine temperaturfeldbeschreibende Differentialgleichung eingeführt werden.

Auch dafür muß wiederum vorausgesetzt werden, daß der Körper homogen und isotrop sein soll. Als zusätzliche Forderung kommt noch dazu, daß das spez. Gewicht und die spez. Wärme von Druck und Temperatur unabhängig sein sollen. Man erhält dann eine Differentialgleichung in der folgenden Form:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\lambda}{\gamma \cdot c} \cdot \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \right) + \frac{e}{\gamma \cdot c} ;$$

Hier bedeutet γ das spezifische Gewicht; c die spezifische Wärme. In verkürzter Form kann man auch schreiben:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \alpha \cdot \Delta \theta + \frac{e}{\gamma \cdot c} ;$$

"e" bedeutet die Energie einer Wärmequelle im Inneren eines Körpers. Es hat die Dimension $\text{kcal/m}^3\text{h}$.

Für zeitlich konstante Wärmeströme, d.h. Systeme im Gleichgewicht ohne Wärmequellen, gilt die Differentialgleichung von Laplace:

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} = 0 ;$$

- 2.2 Möglichkeiten zur Messung der Wärmeleitfähigkeit unter Gasatmosphäre sind sowohl mit stationären als auch dynamischen Meßverfahren möglich.

Die Forderung nach der Feststellung der Einflüsse einer Gasatmosphäre auf die Wärmeleitfähigkeit eines porösen Körpers macht die Anwendung einiger recht guter Verfahren unmöglich. Es ist daher erforderlich, unter den bleibenden Möglichkeiten die auszuwählen, die ein optimales Versuchsergebnis erwarten läßt.

2.2.1 Stationäre Verfahren

2.2.1.1 Bei der Vergleichsmethode nach Wild ⁵⁾ befindet sich ein zylindrischer Prüfkörper zwischen zwei geometrisch völlig ähnlichen Vergleichskörpern mit bekannter Wärmeleitfähigkeit. Mit den freien Stirnseiten liegen die Vergleichskörper an einer "heißen Quelle" bzw. "kalten Senke" an, wobei durch Federn ein konstanter Anpreßdruck aufrecht erhalten wird. Die drei Stäbe werden zur Aufnahme von Thermoelementen in geometrisch völlig gleicher Weise je zweimal radial bis zum Zentrum angebohrt. Die Anordnung ist aus der beigefügten Skizze zu ersehen. Um den Prüfkörper in einer Gasatmosphäre zu halten, ist der Ringspalt zwischen dem Prüfkörper bzw. den Vergleichskörpern und der Strahlungsschutzummantelung mit dem jeweiligen Prüfgas gefüllt. Falls erforderlich, kann die Versuchsanordnung noch mit mehreren, voneinander unabhängigen Schutzheizungen versehen werden, um das gewünschte, rein axiale Wärmegefälle besser anzunähern.

Um die Einflüsse der natürlichen Konvektion gering zu halten, müssen die Stäbe waagrecht liegen. An Meßinstrumenten ist lediglich ein Millivoltmeter erforderlich, mit dem über einen Mehrfachschalter alle Meßstellen erfaßt werden könnten.

Die Ermittlung von λ ist hier relativ einfach und geschieht auf folgende Weise:

Es gilt

$$Q = \lambda \cdot \frac{F}{\delta} \cdot \Delta\theta$$

hier bedeutet δ den Abstand zweier Thermoelemente, $\Delta\theta$ die gemessene Temperaturdifferenz.

$$Q_1 = Q_2 = Q_3$$

$$F_1 = F_2 = F_3$$

$$\delta_1 = \delta_2 = \delta_3$$

$$\text{Also} \quad \lambda_1 \cdot \Delta\theta_1 = \lambda_2 \cdot \Delta\theta_2 = \lambda_3 \cdot \Delta\theta_3$$

$$\text{Da} \quad \lambda_1 = \lambda_3$$

$$\text{und} \quad U_n \sim \Delta\theta_n \quad U_n = \text{Thermospannung}$$

$$\text{gilt} \quad \lambda_2 = \frac{1}{2} \cdot \lambda_{1,3} : \frac{U_1 + U_3}{U_2}$$

Bei dieser Methode werden lediglich die Thermospannungen ermittelt und miteinander ins Verhältnis gesetzt. (Der zweite Vergleichsstab dient lediglich zur Korrektur der Streuverluste. Er wäre grundsätzlich nicht erforderlich.) Der Nachteil dieser Anordnung dürfte darin liegen, daß sich die Einflüsse von Strahlung und Konvektion auf die Meßergebnisse unzureichend ausschalten lassen, wodurch das Ergebnis verfälscht wird. Die zu erwartende Meßgenauigkeit ist auf keinen Fall besser als 15 %.

2.2.1.2 Beim Kugelverfahren befindet sich eine elektrisch beheizte Kupferkugel in der Mitte des aus zwei Halbkugeln bestehenden Prüfkörpers. Die erzeugte Wärme dringt wegen der guten Leitfähigkeit des Kupfers gleichmäßig in die Prüfkugel ein. Die elektrischen Heizleistungen werden durch die Pole der Kugel geführt. In der Äquatorebene der Kugel werden Thermolemente bis zu einer bestimmten Tiefe in Bohrungen eingeführt. Die Kugel selbst wird am besten in einem kugelförmigen Raum zentrisch aufgehängt. Die Wärmeabfuhr geschieht dann durch Leitung des Gases, natürliche Konvektion und Strahlung.

Zur Ermittlung von λ geht man von der Formel

$$Q = - \lambda F \frac{d\theta}{dr}$$

aus und erhält mit $F = 4\pi r^2$ für λ

$$\lambda = Q \cdot \frac{(r_a - r_i)}{4\pi r_a \cdot r_i (\theta_i - \theta_a)} ;$$

Durch Umrechnen in die el. Leistungseinheit und Zusammenziehen der Konstanten ergibt sich

$$\lambda = 0,09275 \cdot N_{el} \text{ (W)} \cdot \frac{(r_a - r_i) \text{ (m)}}{r_a \cdot r_i \text{ (m}^2\text{)} \cdot \Delta\theta \text{ (}^\circ\text{C)}} ;$$

Gemessen werden N_{el} und $\Delta\theta$. Die anderen Größen sind durch die Maße des Prüfkörpers festgelegt.

Eine große Fehlerquelle ist bei dieser Anordnung darin zu sehen, daß es aus Herstellungsgründen nicht möglich sein wird, einen über der ganzen Berührfläche gleichen Wärmeübergang zwischen der Heiz- und der Prüfkugel zu erzielen. Außerdem wird lediglich an der Äquatorebene der Temperaturgradient mit größter Wahrscheinlichkeit senkrecht zur Kugeloberfläche stehen. An den Polen wird das wegen der Störung der Temperaturfelder durch die elektrischen Zu- bzw. Ableitungen sicher nicht mehr der Fall sein. Damit ist der Wärmeausfluß pro Flächeneinheit, der der Berechnung zugrunde liegt, über der ganzen Kugeloberfläche nicht gleich groß. Es dürfte sich mit einer derartigen Anordnung kaum ein Fehler von weniger als 20 % erreichen lassen.

- 2.2.1.3** Beim Radialmeßverfahren befindet sich in einem an der Mantelfläche wassergekühlten zylindrischen Metallrohr, dessen Stirnseiten aus schlecht leitendem V₂A-Stahl bestehen, der ebenfalls zylindrische Prüfkörper. Als Heizung wird ein zylindrischer Heizstab verwendet, der zentrisch im Prüfkörper angeordnet ist und genau von einer Stirnseite zur anderen reicht. Im Ringspalt zwischen Prüfkörper und Kühlmantel befindet sich das jeweilige Gas (He oder CO₂). Der Druck wird während des ganzen Aufheizvorganges durch Druckwächter konstant gehalten. Im Abstand r_a und r_i von der Mittelachse des Prüfstabes sind Thermoelemente in axialer Richtung soweit eingeführt, daß mit einem rein radialen Temperaturgefälle an der Meßstelle gerechnet werden darf.

Zur Ermittlung von λ geht man aus von der Formel

$$Q = - \lambda \cdot F \cdot \frac{d\theta}{dr}$$

und erhält mit $F = 2\pi r \cdot l$:

$$\lambda = Q \cdot \frac{\ln r_a/r_i}{2\pi l (\theta_i - \theta_a)} \quad ;$$

Durch Umrechnen in die elektrische Leistungseinheit und Zusammenziehung der Konstanten ergibt sich

$$\lambda = 0,1855 \cdot N_{el} \text{ (W)} \cdot \frac{\ln r_a/r_i}{l \text{ (m)} \cdot \Delta\theta \text{ (}^\circ\text{C)}}$$

Gemessen werden N_{el} und $\Delta\theta$. Die anderen Größen sind durch die Maße des Prüfkörpers festgelegt.

Um eine für alle Bereiche einheitliche Bezugstemperatur zu erhalten, wird eine mittlere Temperatur δ_m definiert.

Das Temperaturfeld innerhalb der Probe hat einen logarithmischen Verlauf. Eine lineare Interpolation zwischen den Temperaturen δ_a und δ_i ist daher bei exakter Betrachtung nicht gerechtfertigt.

Das Temperaturfeld im Probekörper wird durch folgende Gleichung beschrieben:

$$\theta = \frac{\theta_i - \theta_a}{\ln r_a/r_i} \cdot \ln \frac{r_a}{r} + \theta_a \quad ;$$

Trägt man $\theta = f(r)$ auf und ermittelt die Stelle über r , wo die Kurve den gleichen Anstieg hat wie die gerade Verbindung zwischen θ_a und θ_i , so erhält man einen mittleren Radius r_m

$$r_m = \frac{r_a - r_i}{\ln r_a/r_i} \quad ;$$

Mit diesem mittleren Radius r_m läßt sich die definierte Temperatur θ_m über die Temperaturfeldgleichung errechnen.

Bei der praktischen Auswertung der Versuche ist eine derartige Genauigkeit nicht erforderlich. Bei den auftretenden kleinen Temperaturdifferenzen liegt der durch lineare Interpolation bedingte Fehler innerhalb der Anzeige- und Ablesegenauigkeit der Meßinstrumente.

Es ist im vorliegenden Fall ausreichend, als Bezugstemperatur das arithmetische Mittel zwischen θ_a und θ_i zu wählen.

$$\theta_m = \frac{\theta_a + \theta_i}{2} ;$$

Der verwendete zylindrische Prüfkörper läßt sich verhältnismäßig leicht herstellen. Bei einem genügend großen Verhältnis Länge zu Durchmesser kann in den mittleren Zylinder-ebenen ein rein radiales Temperaturgefälle angenommen werden. Die Verfälschung der Ergebnisse durch den Einfluß der natürlichen Konvektion wird bei waagerechter Probenanordnung gering sein. Der Wärmeübergang durch Strahlung ist bei dieser Versuchsanordnung nicht von Bedeutung. Beim Ermitteln von λ aus der oben angegebenen Formel wird von der pro Längeneinheit zugeführten Leistung ausgegangen. Dies ist nicht exakt, da eine konstante Energiezufuhr über der ganzen definierten Länge l wegen der Änderung des Heizleiterwiderstandes in Abhängigkeit von der Temperatur nicht angenommen werden darf. Der dadurch bedingte Fehler läßt sich durch die Anordnung der Meßstellen auf ein tragbares Minimum reduzieren. Es ist zu erwarten, daß die Meßgenauigkeit bei 10 - 15 % liegt.

2.2.2 Dynamische Verfahren

Es besteht grundsätzlich die Möglichkeit, die Wärmeleitfähigkeit eines Stoffes durch sog. dynamische Meßverfahren zu ermitteln. Dabei unterscheidet man grundsätzlich zwei Arten, die auf völlig unterschiedlichen Vorgängen aufbauen,

nämlich Ausgleichsvorgänge und Temperaturschwingungen.

Bei den Ausgleichsvorgängen hat der Prüfkörper zur Zeit $t = 0$ eine bestimmte Temperatur. Die Umgebungstemperatur wird plötzlich auf einen anderen Wert gebracht und dort konstant gehalten. Die bis zur Aufheizung bzw. Abkühlung des Körpers auf die neue Temperatur verstrichene Zeit ist ein Maß für die Wärmeleitfähigkeit des Stoffes.

Den anderen Fall bilden Vorgänge, bei denen der Körper einer Temperatur ausgesetzt ist, die periodische Schwingungen ausführt. In einem bestimmten Abstand vom "Geber" registriert ein "Empfänger" Schwächung und Verzögerung der ankommenden Schwingungen. Diese Werte lassen sich ebenfalls zur Ermittlung der Wärmeleitfähigkeit verwenden. Beide Vorgänge werden durch die Fourier'sche Grundgleichung beschrieben ¹⁾:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = a \cdot \nabla^2 \theta$$

Zur Lösung dieser Differentialgleichung sind verschiedene Ansätze möglich. Der Faktor "a" setzt sich aus der Wärmeleitfähigkeit, dem spez. Gewicht und der spez. Wärme des Prüfkörpers zusammen. Alle drei Größen sind bei homogenen Festkörpern ganz leicht temperaturabhängig. Bei der Prüfung eines porösen Körpers unter Gasatmosphäre dürften die Einflüsse von spez. Gewicht und spez. Wärme größer werden.

$$a = \frac{\lambda}{\gamma \cdot c} ;$$

Man kann also bereits aus der Formel ersehen, daß bei porösen Stoffen unter Gasatmosphäre die dynamischen Methoden schlecht zu verwenden sind, da sowohl γ als auch c_p Funktionen von θ sind und vorher bestimmt werden müßten.

2.3 Auswahl einer Möglichkeit

Aus den unter 2.22 aufgeführten Gründen ($\gamma, c_p = f(\theta)$) mißt man bei den dynamischen Verfahren die sogenannte Temperaturleitfähigkeit $\lambda/\gamma \cdot c_p$, man muß also, um λ zu berechnen, auch noch das temperaturabhängige c_p kennen. Der Weg über ein statisches Meßverfahren erscheint uns einfacher, wobei wir jedoch auch die Anwendung von dynamischen Methoden im Auge behalten. Daher haben wir aus den unter 2.2. aufgeführten Methoden diejenige ausgewählt, die bei geringstem Aufwand gute Kontroll- und Regelmöglichkeiten sowie optimale Meßgenauigkeit erwarten läßt. Unter Berücksichtigung dieser Gesichtspunkte scheidet das Kugelverfahren wegen zu schwieriger Herstellung der Prüfeinrichtung und wegen der verhältnismäßig geringen erzielbaren Meßgenauigkeit aus. Das Vergleichsverfahren nach Wild scheint gegenüber der Radialmeßmethode den Nachteil zu haben, daß die Ergebnisse durch den Einfluß der natürlichen Konvektion verfälscht werden. Es erschien uns am günstigsten, die Messung nach der Radialmeßmethode durchzuführen.

3. Versuchsaufbau

3.1 Beschreibung der Versuchsanordnung

Der grundsätzliche Aufbau der Einrichtung ist bereits unter 2.23 beschrieben. Um den Aus- und Einbau der Meß- und Heizleiter ohne Schwierigkeiten vornehmen zu können, wurde ein Zweibehältersystem als Versuchsanordnung gewählt. In dem einen Behälter befindet sich die Probe, der zweite dient lediglich der mühelosen und druckfesten Durchführung der Thermolemente und Heizleiter. Beide Behälter sind durch zwei Ermeterohre miteinander verbunden; in einem liegen die Heizdrähte, im anderen die Thermolemente, um eine Induktion auszuschalten. Gaszuführung, Sicherheitsventil, Manometer, Druckmeßumformer und Absaugstutzen werden an den Deckeln des Prüfbehälters angeschlossen.

Die erforderlichen Meßgeräte sind Mehrfachpunktdrucker, Wattmeter und ein Transformator. Der Druckbehälter wurde in der Institutswerkstatt hergestellt.

4. Praktischer Teil

4.1 Ablauf der Versuche

Zunächst soll mit Hilfe einer im Institut für Reaktorwerkstoffe der KFA vorhandenen, sehr genau arbeitenden Meßeinrichtung die Wärmeleitfähigkeit des zu untersuchenden Kohlesteins unter Luftatmosphäre ermittelt werden. Parallel dazu wird an unserem Institut der erste Versuch ebenfalls mit Luft und unter Atmosphärendruck durchgeführt. Die Ergebnisse werden zur Kontrolle miteinander verglichen, um den Eigenfehler unserer Anlage feststellen zu können. Erforderlichenfalls kann der so ermittelte Korrekturfaktor bei der Auswertung der Ergebnisse der späteren Versuche verwendet werden. Der Kohlestein wird anschließend unter Helium- und CO_2 -Atmosphäre gemessen. Die Proben werden in die Versuchsapparatur hineingebaut und angeschlossen. Die Apparatur wird druckfest verschraubt und ca. einen halben Tag lang mit einer Vakuumpumpe leergepumpt, eventuell länger. Anschließend wird der Behälter mit dem Gas bis zu einem Druck von 15 atü gefüllt. Vor Beginn der Messung muß hinreichend Zeit verstreichen, so daß das Gas in alle Poren der Probe eindringen kann. Dann wird bei dem durch das Sicherheitsventil eingestellten Druck von 15 atü und nach Einstellen der Kühlwassermenge und der Heizleistung mit den Versuchen begonnen. Der Mehrfachpunktdrucker schreibt während des ganzen Aufheizvorgangs die Veränderung der Temperaturen an den 4 Meßstellen. Nachdem sich ein stationärer Zustand eingestellt hat, wird nochmals die Heizleistung gemessen. Die anderen Meßergebnisse sind vom Drucker festgehalten.

Zur Ermittlung des nächsten Meßpunktes bei höherer Temperatur wird die Heizleistung mittels eines Regeltrafos auf

einen höheren Spannungswert eingestellt. Die Kühlwasser menge kann konstant gehalten oder nach Bedarf vergrößert oder verkleinert werden.

Nachdem so bei dem Druck von 15 atü die Wärmeleitfähigkeit bei einigen Temperaturen im Bereich von Raumtemperatur bis 250° C ermittelt wurde, kann bei der nächst tieferen Druckstufe gemessen werden.

4.2 Auswertung der Ergebnisse

Druck und zugeführte el. Leistung lassen sich vor Beginn des Versuches in gewissen Grenzen einstellen. Da der Druck auch am Ende des Versuches näher bei seinem Sollwert liegen wird als die el. Leistung, wird dieser bei der Auswertung als konstanter Parameter angenommen. Bei der Messung fährt man vom jeweils eingestellten Druck ausgehend alle Leistungsstufen durch. Die Ermittlung von λ für einen bestimmten Druck und unterschiedlichen Temperaturen kann dann graphisch wie folgt vor sich gehen:

1. $P = \text{konst.}$ einstellen
2. N_{el} einstellen
3. Auftragen von θ_m über $N_{el} = \text{const.}$ (Alle Größen gemessen!)
4. Errechnen von λ bei den verschiedenen mittleren Temperaturen. Gegebenenfalls muß eine Korrektur mit dem eingangs ermittelten Korrekturfaktor vorgenommen werden.
5. Auftragen von λ über der jeweiligen Temperatur θ_m
6. Ausgehend von ganzzahligen Werten für λ wird nun auf θ_m zurückinterpoliert.
7. Man hat nun bei einer bestimmten Heizleistung für einen bestimmten ganzzahligen λ -Wert eine Temperatur und einen Druck.

8. Diese Werte werden für alle Drücke in ein Diagramm eingetragen und ergeben ein p- θ -Diagramm, aus dem sich die Wärmeleitfähigkeit genau ablesen läßt.

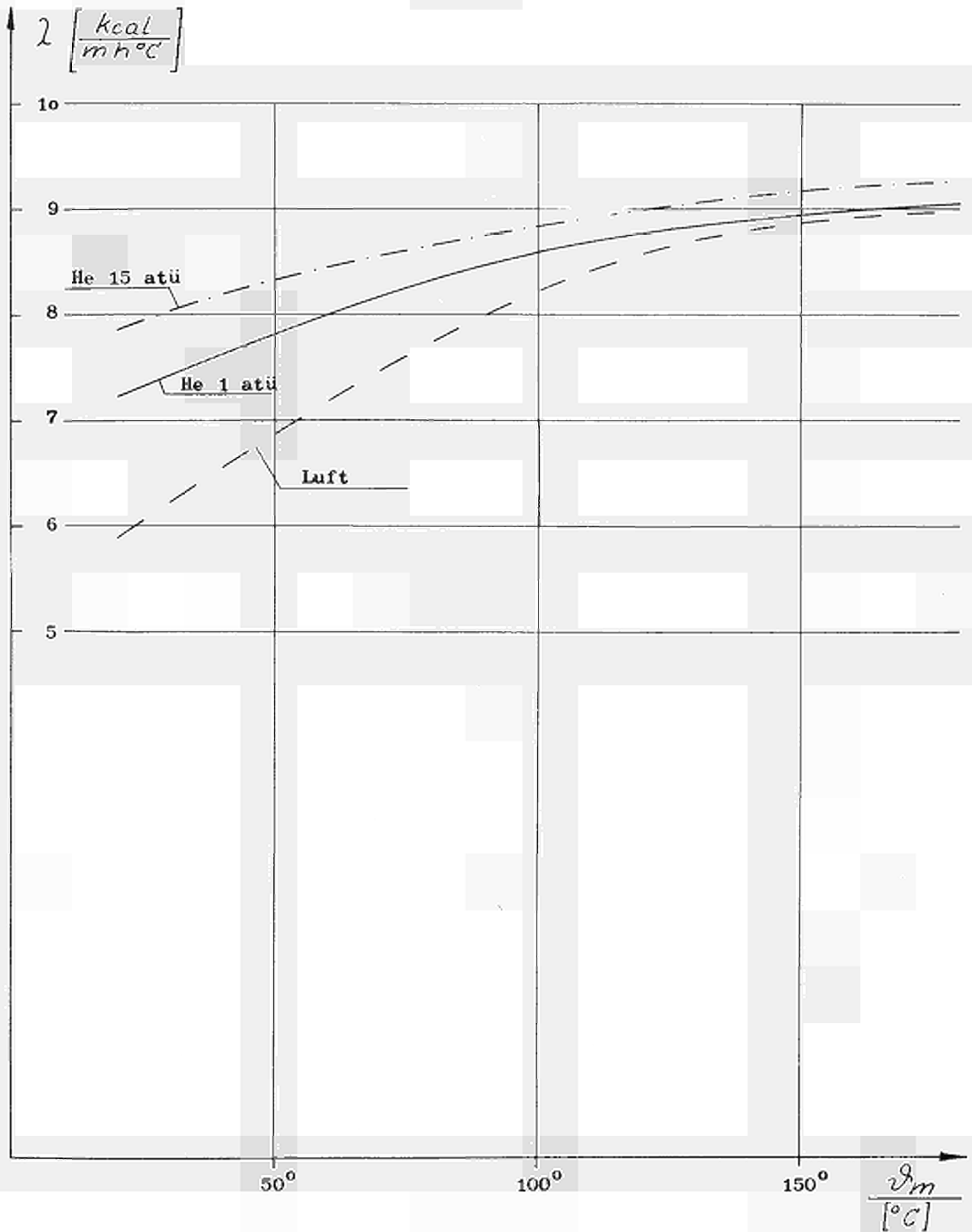
5. Vorläufige Meßergebnisse

Mit Hilfe der oben beschriebenen Apparatur wurden verschiedene Eichungen und Messungen durchgeführt mit dem Ziel, die Wärmeleitfähigkeit eines porösen Hartkohlesteins unter Gaseinfluß zu ermitteln.

Der Probekörper bestand aus einem Hartkohlezylinder der Qualität EK 10, Hersteller Fa. Ringsdorf-Werke in Mehlem bei Bonn. Aus einem blockgepreßten Stein wurde die Probe derart herausgeschnitten, daß der gemessene Temperaturabfall innerhalb der Probe senkrecht zur Preßrichtung lag.

Entgegen der ursprünglichen Planung war der Hartkohlezylinder zusätzlich mit einem 2,5 mm starken Aluminiumrohr umgeben worden, um einer Zirkulation im Prüfbehälter entgegenzuwirken.

Bei der Genauigkeit der bisher verwendeten Meßapparatur kommt den auf Seite 19 angegebenen Ergebnissen eine überwiegend qualitative Bedeutung zu. Eine exaktere Messung dürfte erst dann möglich sein, wenn die beschriebene Apparatur mit Hilfe bereits bestellter Zusatzgeräte auf größere Anzeigegenauigkeit gebracht worden ist. Dies geschieht hauptsächlich durch eine Steigerung der Anzeigegenauigkeit unseres registrierenden Millivoltmeterpunktschreibers. Die angegebenen Ergebnisse dürften mit einem Fehler von 10 - 20 % behaftet sein. Die Anlage ist jetzt soweit ausgebaut, daß in einigen Wochen Serienmessungen durchgeführt werden können. Wie eingangs schon erwähnt, planen wir dieselbe Anlage auch zur Messung der Wärmeleitfähigkeit von Coated-Particles-Schüttungen zu verwenden.



Wärmeleitfähigkeit eines Hartkohlesteines der Qualität EK 10 von Firma Ringsdorff senkrecht zur Preßrichtung gemessen.

6. Literaturnachweis

1. Gröber, Erk, Grigull:
Springer-Verlag 1961
"Wärmeübertragung"
2. F. Kohlrausch:
B.G. Teubner 1944
"Praktische Physik
I und II"
3. W.D. Kingery
J. Wiley & Sons
Inc. New York 1959
"Property Measurements
at High Temperatures"
4. E. Eckert
Springer-Verlag 1949
"Einführung in den Wärme-
und Stoffaustausch"
5. D. Wild
VDI-Zeitung (1953) Nr. 3
Band 100
"Über die Wärmeleitfähigkeit
von Kunstkohle"
6. J. Vardi and M. Hoch
J. of The American Ceramic
Society, Vol. 46 Nr. 3
S. 129
"Thermal Conductivity of
Anisotropic Solids at
High Temperatures - The
Thermal Conductivity of
Molded and Pyrolytic
Graphites"
7. GAMD - 2089 - Report
(General Atomic)
"An Apparatus for
Measuring the Thermal
Conductivity of Graphite
at Temperatures above
2000° F"

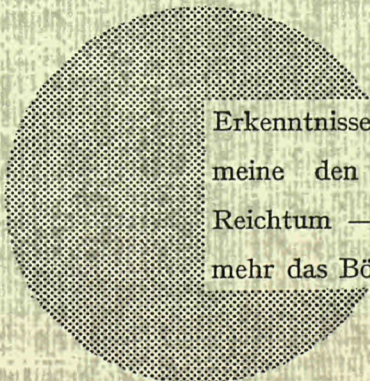
AN UNSERE LESER

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).

PRESSES ACADEMIQUES EUROPEENNES

98, Chaussée de Charleroi, Bruxelles 6

Banque de la Société Générale - Bruxelles
compte N° 964.558,
Banque Belgo Congolaise - Bruxelles
compte N° 2444.141,
Compte chèque postal - Bruxelles - N° 167.37,
Belgian American Bank and Trust Company - New York
compte No. 22.186,
Lloyds Bank (Europe) Ltd. - 10 Moorgate, London E.C.2,
Postcheckkonto - Köln - Nr. 160.861.

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

LUXEMBOURG

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

DEUTSCHLAND

BUNDESANZEIGER
Postfach - Köln 1

NEDERLAND

STAATSDRUKKERIJ
Christoffel Plantijnstraat - Den Haag

FRANCE

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

ITALIA

LIBRERIA DELLO STATO
Piazza G. Verdi, 10 - Roma

UNITED KINGDOM

H. M. STATIONARY OFFICE
P. O. Box 569 - London S.E.1

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