

EUR 4478 d

Assoziation

Europäische Atomgemeinschaft - EURATOM
Centre d'Etude de l'Energie Nucléaire - C.E.N.

**TEMPERATURREGELUNG VON
BESTRAHLUNGSPROBEN
DURCH GASDRUCKVERÄNDERUNG**

von

W. HEBEL

1970



Bericht abgefasst bei C.E.N.
Centre d'Etude de l'Energie Nucléaire, Mol - Belgien
Assoziation Nr. 006-60-5 BRAB

EURATOM

2.7. 1970

BIBLIOTH. - R. T.

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,— FF 4,45 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 L. Vanmelle
Luxemburg, Mai 1960

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

EUR 4478 d

TEMPERATURE CONTROL OF IRRADIATION EXPERIMENTS BY CHANGES IN GAS PRESSURE by W. HEBEL

Association : European Atomic Energy Community — EURATOM
Centre d'Etude de l'Energie Nucléaire — CEN

Report prepared at CEN

Centre d'Etude de l'Energie Nucléaire, Mol (Belgium)

Association No. 006-60-5 BRAB

Luxembourg, May 1970 — 26 Pages — 9 Figures — FB 40,—

The report deals with a process for setting the temperature of a heated (or cooled) body at a desired value and for controlling or adjusting this temperature as required. The process is based on the transfer of heat through a gas gap between parallel or concentric walls, where the heat conductivity of the gas is changed by means of its own pressure.

For irradiations of material in test reactor BR2, Mol, an automatic temperature control system working on the same principle was constructed and successfully put into operation in the spring of 1969.

EUR 4478 d

TEMPERATURE CONTROL OF IRRADIATION EXPERIMENTS BY CHANGES IN GAS PRESSURE by W. HEBEL

Association : European Atomic Energy Community — EURATOM
Centre d'Etude de l'Energie Nucléaire — CEN

Report prepared at CEN

Centre d'Etude de l'Energie Nucléaire, Mol (Belgium)

Association No. 006-60-5 BRAB

Luxembourg, May 1970 — 26 Pages — 9 Figures — FB 40,—

The report deals with a process for setting the temperature of a heated (or cooled) body at a desired value and for controlling or adjusting this temperature as required. The process is based on the transfer of heat through a gas gap between parallel or concentric walls, where the heat conductivity of the gas is changed by means of its own pressure.

For irradiations of material in test reactor BR2, Mol, an automatic temperature control system working on the same principle was constructed and successfully put into operation in the spring of 1969.

EUR 4478 d

Assoziation

Europäische Atomgemeinschaft - EURATOM
Centre d'Etude de l'Energie Nucléaire - C.E.N.

TEMPERATURREGELUNG VON
BESTRAHLUNGSPROBEN
DURCH GASDRUCKVERÄNDERUNG

von

W. HEBEL

1970



Bericht abgefasst bei C.E.N.
Centre d'Etude de l'Energie Nucléaire, Mol - Belgien
Assoziation Nr. 006-60-5 BRAB

ZUSAMMENFASSUNG

Der Bericht behandelt ein Verfahren zur Einstellung eines geheizten (oder gekühlten) Körpers auf eine gewünschte Temperatur und die Regelung beziehungsweise Änderung dieser Temperatur in beliebiger Weise. Das Verfahren beruht auf der Wärmeübertragung durch einen Gasspalt zwischen parallelen oder konzentrischen Wänden, wobei die Wärmeleitfähigkeit des Gases mit Hilfe seines Druckes verändert wird.

Für Materialbestrahlungen im Versuchsreaktor BR2, Mol, wurde eine auf dem genannten Prinzip beruhende automatische Temperaturregelanlage gebaut und mit Erfolg im Frühjahr 1969 eingesetzt.

SCHLAGWORTE

HEAT TRANSFER
REGULATIONS
TEMPERATURE
GASES
THERMAL CONDUCTIVITY
PRESSURE
B R 2
REGULATION

1. Einleitung. *)
2. Theoretische Grundlagen.
3. Versuchsanlage.
4. Versuchsergebnisse.
 - 4.1. Wärmeleitfähigkeit als Funktion des Gasdruckes.
 - 4.2. Betriebsverhalten.
 - 4.2.1. Geometrischer Aufbau.
 - 4.2.2. Regelverhalten.
 - 4.2.3. Betriebsstörungen.
5. Anwendungen.
6. Anhang
 - Abbildung 1 : Wärmeleitfähigkeit von Gasen als Funktion des Gasdruckes.
 - Abbildung 2 : Schematischer Aufbau der Versuchsanlage.
 - Abbildung 3 : Temperatur der beiden konzentrischen Wände als Funktion des Wärmeflusses.
 - Abbildung 4 : Temperaturgradient des Gasspaltcs als Funktion des Wärmeflusses.
 - Abbildung 5 : Temperatur der geheizten Wand als Funktion des Vakuums im Gasspalt.
 - Abbildung 6 : Messwerte der Wärmeleitfähigkeit des Gases als Funktion des Druckes.
 - Abbildung 7 und 8 : Zeitlicher Temperaturverlauf der geheizten Wand bei Änderung der Betriebsbedingungen.
 - Abbildung 9 : Photographie der Temperaturkontrollwarte.

*) Manuskript erhalten am 6. Februar 1970

Zeichenerklärung.

Folgende Zeichen und Abkürzungen werden im Text verwendet :

A	Anzahl der Moleküle je MOL
C	Konstante vgl. Gleichung (10)
C_p	Spezifische Wärme des Gases bei konstantem Druck
C_v	Spezifische Wärme des Gases bei konstantem Volumen
F	Wärmeübertragungsfläche
L	mittlere freie Weglänge der Gasmoleküle
N	Anzahl der Moleküle je cm^3
p	Gasdruck
Q	Wärmeleistung
q	Wärmestromdichte
Ro	allgemeine Gaskonstante
s	Länge allgemein ; Breite des Gasspaltes
T	absolute Temperatur
α	Kennzahl für die Beschaffenheit der Wandoberflächen
β	Abkürzung vgl. Gleichung (4)
δ	Moleküldurchmesser
μ	Quotient des spezifischen Wärmen des Gases (C_p/C_v)
λ	Wärmeleitfähigkeit (des Gases)
λ'	modifizierte Wärmeleitfähigkeit des Gases vgl. Gleichung (7) und (8)
λ_m	mittlere Wärmeleitfähigkeit des Gases zwischen zwei Temperaturgrenzen

Temperaturregelung von Bestrahlungsproben durch Gasdruckveränderung.

1. Einleitung.

Der vorliegende Bericht behandelt ein Verfahren zur Einstellung eines geheizten (oder gekühlten) Körpers auf eine gewünschte Temperatur und die Regelung beziehungsweise Änderung dieser Temperatur in beliebiger Weise. Das Verfahren beruht auf der Wärmeübertragung durch einen Gasspalt zwischen parallelen oder konzentrischen Wänden, wobei die Wärmeleitfähigkeit des Gases mit Hilfe seines Druckes verändert wird.

Bekanntlich ist die Wärmeleitfähigkeit eines Gases vom Gasdruck weitgehend unabhängig, wird jedoch dann eine Funktion des Druckes wenn der Abstand der wärmeabgebenden zur wärmeaufnehmenden Wand ungefähr gleich oder kleiner ist als die mittlere freie Weglänge der Gasmoleküle im Zwischenraum.

Die bei der Verwirklichung des Verfahrensprinzips verhältnismässig kleinen Wandabstände beziehungsweise Gasdrücke stellen gewisse Ansprüche an Herstellungsgenauigkeit und Vakuumtechnik, die aber keine unlösbaren praktischen Schwierigkeiten mit sich bringen zu mindest nicht in dem hier besonders untersuchten Anwendungsfall. Das Verfahren der Temperaturregelung wurde im Zusammenhang mit Bestrahlungsversuchen an einem Kernreaktor entwickelt. Hier stellte sich die Aufgabe, die Temperatur von Bestrahlungsproben in gewünschter Weise konstant zu halten oder zu verändern unabhängig von Änderungen oder von Ungenauigkeiten bei der Vorausbestimmung der nuklearen Erwärmung der Proben. Für Materialbestrahlungen im Versuchsreaktor BR2, MOL, wurde eine auf dem genannten Prinzip beruhende automatische Temperaturregelanlage gebaut, im Vorversuch geprüft und mit Erfolg im Frühjahr 1969 eingesetzt. Die Verwendung des Temperaturregelverfahrens lässt sich jedoch auch ganz allgemein denken sowohl in der Wärme- wie auch in der Kältetechnik.

Ein Vergleich des hier beschriebenen Temperaturregelverfahrens mit einem bisher häufig bei Bestrahlungsversuchen eingesetzten Verfahren, beruhend auf der Mischung von Gasen unterschiedlicher Wärmeleitfähigkeit, schliesst den Bericht ab.

2. Theoretische Grundlagen.

Bei der Wärmeübertragung zwischen parallelen beziehungsweise konzentrischen Wänden, die durch einen Gasspalt voneinander getrennt sind, stellt sich gemäss dem Wärmefluss ein Temperaturgradient in dem Gasspalt ein der durch folgende allgemeine Beziehung beschrieben wird :

$$Q = \lambda \cdot F \cdot \frac{dT}{ds}$$

Ist die Wand höherer Temperatur flächengleich mit der Wand niedriger Temperatur (bei engen Spalten auch nahezu gültig für konzentrische Rohre), so lässt sich die Gleichung auf folgende Weise vereinfachen :

$$q = \frac{\lambda_m}{S} \cdot (T_1 - T_2) \quad (2)$$

Bei gegebenem Abstand (S) der Flächen und bestimmtem Wärmefluss (q) kann durch eine Änderung der Wärmeleitfähigkeit (λ) des Gases im Zwischenraum die Temperatur (T_1) der wärmeren Wand beeinflusst werden. Wie sich aus der kinetischen Gastheorie ergibt, ist die Wärmeleitfähigkeit eines Gases solange unabhängig von seinem Druck, wie die mittlere freie Weglänge der Gasmoleküle durch gegenseitige Stöße und nicht durch umgebende Wandungen bestimmt wird. Bei niedrigem Gasdruck jedoch und bei entsprechend kurzem Abstand der Wärmeaustauschflächen ist, nach einem Übergangsbereich, die durch das Gas übertragene Wärmemenge der Anzahl der Gasmoleküle bzw. dem Gasdruck proportional. Nach einer von Smoluchowski gegebenen Beziehung (I) kann die obengenannte Gleichung, in Anlehnung an ähnliche Überlegungen zur Gasfähigkeit, in folgender Weise dem erwähnten Tatbestand angepasst werden :

$$q = \frac{\lambda_m}{S + 2g} \cdot (T_1 - T_2) \quad (3)$$

Hierbei stellt λ_m den vom Gasdruck unabhängigen, über den Temperaturbereich $T_1 - T_2$ gemittelten Wert der Wärmeleitfähigkeit des Gases dar, während der Zusatz $2g$ zum Abstand S der parallelen Wände der Verminderung der Wärmeleitfähigkeit infolge der Verdünnung des Gases Rechnung trägt. Die Bestimmung des Zusatzgliedes $2g$ wird aus der kinetischen Gastheorie hergeleitet, die folgende Beziehung liefert :

$$g = \frac{2 - \alpha}{\alpha} \cdot \frac{9K - 5}{2(K + 1)} \cdot L = \beta \cdot L \quad (4)$$

Hierbei trägt der erste Faktor des Produktes, in Verbindung mit der Art des Gases, der Beschaffenheit der Wandoberflächen Rechnung. Der Koeffizient α ist stets kleiner oder höchstens gleich 1 (letzteres im Falle von stark gerauhten Oberflächen). Der zweite Faktor enthält das Verhältnis der spezifischen Wärmen des Gases ($K = C_p/C_v$), während der dritte Faktor (L) die mittlere freie Weglänge der Gasmoleküle darstellt. Unter gegebener Gas- und Oberflächenbedingungen ist deshalb das Zusatzglied g direkt proportional der mittleren freien Weglänge der Gasteilchen

Diese ist in einem unbegrenzten gasgefüllten Raum, umgekehrt proportional der Anzahl der Gasmoleküle je Volumeneinheit und deren Durchmesser ; für sie gilt die Beziehung :

$$L = \frac{1}{\sqrt{2} \cdot \pi \cdot N \cdot \delta^2} \quad (5)$$

Die Dichte der Gasmoleküle kann durch Druck und Temperatur des Gases ausgedrückt werden, so dass für die mittlere freie Weglänge der Moleküle eines idealen Gases die Abhängigkeit besteht :

$$L = \frac{1}{\sqrt{2} \cdot \pi \cdot A \cdot \frac{p}{R_0 \cdot T} \cdot \delta^2} \quad (6)$$

In der folgenden Tabelle sind für einige Gase die Moleküldurchmesser (über die Gaszähigkeit ermittelt) und die mittlere freie Weglänge der Moleküle bei 20°C und verschiedenen Drücken zusammengefasst :

	Molekül- durchm. δ (cm)	mittlere freie Weglänge L (cm) für Druck in torr (mm Hg)					
		760 torr	100 torr	10 torr	1 torr	0,1	0,01
Wasserstoff	$2,74 \cdot 10^{-8}$	$1,2 \cdot 10^{-5}$	$9,1 \cdot 10^{-5}$	$9,1 \cdot 10^{-4}$	$9,1 \cdot 10^{-3}$	0,091	0,91
Helium	$2,18 \cdot 10^{-8}$	$1,9 \cdot 10^{-5}$	$14,5 \cdot 10^{-5}$	$14,5 \cdot 10^{-4}$	$14,5 \cdot 10^{-3}$	0,145	1,45
Stickstoff	$3,75 \cdot 10^{-8}$	$0,6 \cdot 10^{-5}$	$4,6 \cdot 10^{-5}$	$4,6 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-3}$	0,046	0,46
Sauerstoff	$3,61 \cdot 10^{-8}$	$0,7 \cdot 10^{-5}$	$5,3 \cdot 10^{-5}$	$5,3 \cdot 10^{-4}$	$5,3 \cdot 10^{-3}$	0,053	0,53
Kohlendioxyd	$4,59 \cdot 10^{-8}$	$0,4 \cdot 10^{-5}$	$3,0 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-3}$	0,03	0,30

Aus der Tabelle erkennt man, dass die mittlere freie Weglänge der Moleküle bei einem Gasdruck von 0,1 torr in der Grössenordnung von 1 mm liegt. Unter Berücksichtigung, dass der Faktor β ungefähr zwischen 1 und 2,5 schwankt kann man schliessen, dass bei Wandabständen der Grössenordnung von 0,1 bis 1 mm, die keine übertriebenen Anforderungen an Herstellungsgenauigkeit stellen, ein bedeutender Effekt auf die Wärmeleitfähigkeit der Gase zustande kommt, ohne dass das hierfür erforderliche Vakuum eine verfahrenstechnische Schwierigkeit darstellt.

Es lässt sich ferner mit Hilfe der Tabelle feststellen, dass bei gleichem Gasdruck die freie Weglänge der Heliumatome am grössten ist, so dass bei der Verwendung von Helium eine relativ stärkere Abnahme der Wärmeleitfähigkeit auftritt. Diese Folgerung wurde auch bei den im folgenden beschriebenen Versuchen bestätigt.

Um die Wirkung der Veränderung der Wärmeleitfähigkeit des Gases zu verdeutlichen, kann das Verhältnis der Wärmeleitfähigkeit bei niedrigem Gasdruck zur vom Gasdruck unabhängigen Wärmeleitfähigkeit dienen. Dieses Verhältnis kann auf folgende Weise gebildet werden :

$$q = \frac{\lambda_m}{S + 2 \cdot \beta \cdot L} \cdot (T_1 - T_2) \stackrel{!}{=} \frac{\lambda'}{S} (T_1 - T_2) \quad (7)$$

Hieraus ergibt sich :

$$\frac{\lambda'}{\lambda_m} = \frac{1}{1 + 2 \cdot \beta \cdot \frac{L}{S}} \quad (8)$$

bzw. bei Berücksichtigung der Gleichungen (4) und (6)

$$\frac{\lambda'}{\lambda_m} = \frac{1}{1 + \left(\frac{2-\alpha}{\alpha}\right) \cdot C \cdot \frac{T_m}{p \cdot S}} \quad (9)$$

mit

$$C = \frac{9K - 5}{K + 1} \cdot \frac{R_0}{\sqrt{2} \cdot \pi \cdot A \cdot \delta^2} \quad (10)$$

einer vom Gas abhängigen Konstanten.

Das Verhältnis der Wärmeleitfähigkeiten ist in der Abbildung 1 des Anhangs für die Gase Luft und Helium für verschiedene Wandabstände und für verschiedene mittlere Gastemperaturen dargestellt als Funktion des absoluten Druckes im Gasspalt. Man erkennt hieraus, dass nach einem anfänglichen Übergangsbereich die relative Abnahme der Wärmeleitfähigkeit proportional dem absoluten Gasdruck verläuft. Ferner ist aus dem Diagramm ersichtlich, dass bei gleichem Gasdruck die Wärmeleitfähigkeit abnimmt mit kleiner werdendem Spalt und mit grösser werdender mittlerer Gastemperatur, weil beide Parameter die relative freie Weglänge der Gasmoleküle vergrössern. Vergleicht man die Gase Luft und Helium, so kann man feststellen, dass zum Erreichen der gleichen relativen Verminderung der Wärmeleitfähigkeit, für Luft ein ungefähr dreimal niedriger Gasdruck erforderlich ist als für Helium.

Die Erklärung hierfür ist in den unterschiedlichen Gaskennwerten zu suchen. So ist zum Beispiel der Wert der Konstanten C

$$\text{für Luft } C = 5,3 \cdot 10^{-5} \text{ torr cm/}^\circ\text{K}$$

$$\text{und für Helium } C = 18,5 \cdot 10^{-5} \text{ torr cm/}^\circ\text{K}$$

Die Dimension der Konstanten C ist so gewählt, dass bei ihrer Verwendung in Gleichung (9) die mittlere Gastemperatur T_m in $^\circ\text{K}$, der Druck des Gases im Zwischenraum p in torr und der Wandabstand S in cm einzusetzen sind.

Im Falle von konzentrischen Rohren ist der relativen Wärmedehnung der beiden Rohre Rechnung zu tragen, die den tatsächlichen Abstand der Wände beeinflusst. Auch ist bei der Ermittlung der Wärmeübertragung zwischen den parallelen Wänden zu prüfen, ob der Wärmeaustausch durch Strahlung eine bedeutende Rolle spielt und gegebenenfalls zu berücksichtigen ist. Um eine Vorstellung von der Strahlungswärme zu geben, sei erwähnt, dass sie bei Temperaturen über 700 bis 800°C mehr als 1 W/cm² betragen kann. Im Vergleich dazu stehen bei Bestrahlungsversuchen in einem Kernreaktor im allgemeinen Wärmestromdichten, die ein Vielfaches von dem genannten Wert betragen und bei niedrigerer Wandtemperatur übertragen werden.

3. Versuchsanlage.

Zur Prüfung der dargelegten theoretischen Zusammenhänge wurde eine Versuchsanlage errichtet, die auch gleichzeitig dazu dienen sollte, eine geeignete automatische Temperaturregelung zu erproben. Der schematische Aufbau der Versuchsanlage ist in Abbildung 2 dargestellt. Sie besteht aus folgenden wesentlichen Bauelementen :

- Ein zylindrisches Rohr mit Aussendurchmesser 22 mm und einer Länge von 220 mm; das im Innern eine elektrische Heizwicklung enthält, in seiner Wand an mehreren Stellen eingelötete Thermoelemente trägt und an den beiden Enden besondere Zentrierteile besitzt, die eine genaue Zentrierung des Rohres in dem umgebenden Hüllrohr erlauben, ohne dass sie einen bedeutenden Wärmeverlust zulassen.
- Ein Hüllrohr, das über das beheizte Rohr geschoben ist und einen konzentrischen Gasspalt von ein oder mehreren Zehntel Millimetern Stärke freilässt. Es umschließt das beheizte Rohr hermetisch, ist mit einer Gaszuführungsleitung verbunden und trägt auf seiner Aussenwand aufgelötete Thermoelemente.
- Ein Regeltransformator zur Einstellung der gewünschten elektrischen Heizleistung.
- Ein von Wasser durchflossener Behälter, der die beheizte Kapsel enthält und für Ihre Kühlung sorgt.
- Eine ungefähr 30 m lange Gaszuführungsleitung von einigen Millimetern Durchmesser, die die beheizte Kapsel mit der Gasversorgungsanlage verbindet.
- Eine Gasversorgungsanlage bestehend aus einer Druckgasflasche (z.B. mit Helium gefüllt) und einer mechanischen Vakuumpumpe.
- Ein automatisches Regelventil für die Gasmenge, die aus der Druckgasflasche entnommen wird.
- Ein von Hand einstellbares Drosselventil für die Gasmenge, die von der Vakuumpumpe abgesaugt wird. An die Verbindungsleitung zwischen beiden Regelventilen ist die Gasversorgungsleitung der beheizten Kapsel angeschlossen.

- Ein Temperaturregler (PID) mit einstellbarem Sollwert, der den von der Druckflasche kommenden Gasdurchsatz über das automatische Regelventil gemäss der Abweichung von der Solltemperatur der Kapsel erhöht oder senkt. Dabei bleibt die Vakuumpumpe ständig in Betrieb. In der Verbindungsleitung zwischen den beiden Regelventilen stellt sich dadurch ein unterschiedlicher Gasdruck ein, der von dem Öffnungsgrad des automatischen Regelventils abhängt.
- Eine um das automatische Regelventil geführte Bypassleitung mit Magnetventil, das bei Überschreiten einer oberen Grenztemperatur der Kapsel infolge Störung des Temperatursystems automatisch öffnet, wobei der Gasspalt der Kapsel sofort unter Druck gesetzt wird und somit die Kapseltemperatur sinkt.
- Verschiedene Messgeräte für Gasdruck, Vakuum, Temperatur, Gasdurchsatz und elektrische Heizleistung

Die Hauptkennwerte der Versuchsanlage sind nachfolgend zusammengefasst :

- Maximal erzeugbare Wärmestromdichte auf der Oberfläche des beheizten Rohres mit Hilfe der regelbaren elektrischen Heizung 35 W/cm²
- Breite des konzentrischen Gasspaltes bei Raumtemperatur ; durch verschiedene Hüllrohre wahlweise 0,05 mm
oder 0,1 mm
oder 0,2 mm
- Höchstzulässige Wandtemperatur des beheizten Rohres (durch Konstruktionsmaterialien bedingt) 500 °C
- Gasdurchsatz durch das automatische Regelventil, einstellbar bis zu einem Maximalwert von 60 Ncm³/min
- Volumen der zwischen den beiden Regelventilen befindlichen Anlageteile 5 dm³
- Ansaugleistung der Vakuumpumpe gegen Atmosphäre 6 m³/h

4. Versuchsergebnisse.

Mit Hilfe der oben beschriebenen Versuchsanlage wurden verschiedene Versuche durchgeführt, die Auskunft geben sollten über die durch den konzentrischen Gasspalt übertragene Wärmemenge in Abhängigkeit vom Gasdruck und über die Möglichkeit, die Temperatur des beheizten Körpers mit Hilfe des Regelsystems entweder konstant zu halten gegenüber Änderungen der Heizleistung oder beliebig zu verändern bei gleicher Heizleistung.

4.1. Wärmeleitfähigkeit als Funktion des Gasdruckes.

Die Ergebnisse der Versuche sind in Diagrammen des Anhangs zusammengestellt. Es werden folgende Darstellungen gegeben

Abbildung 3 : Temperatur der beiden konzentrischen Wände als Funktion des Wärmeflusses. Der Temperaturverlauf wurde bei 1 Atmosphäre Gasdruck (absoluter Druck) und bei einer Breite des Gasspalttes von 0,09 mm (kalter Zustand) gemessen. Der Betriebsdruck lag über dem Druckbereich, wo sich der Einfluss auf die Wärmeleitfähigkeit des Gases bemerkbar macht. Die Messungen wurden für Luft und Helium durchgeführt und dienten als Vergleichsbasis für die späteren Messungen bei reduziertem Gasdruck. Man erkennt im Temperaturverlauf der kälteren Wand zwei verschiedene Neigungen, die die Art des Wärmeübergangs an das Kühlwasser bei laminarer und turbulenter Strömung erkennen lassen.

Abbildung 4 : Temperaturgradient über dem konzentrischen Gasspalt als Funktion des Wärmeflusses. In dieser Darstellung wird gezeigt, wie sich die Messwerte von den durch Rechnung ermittelten Werte unterscheiden. Bei der Rechnung wurde die relative Wärmedehnung der konzentrischen Rohre berücksichtigt und die aus der Literatur bekannten Wärmeleit-zahlen der Gase Luft und Helium verwendet. Es lässt sich feststellen, dass für Luft die Mess- und Rechenwerte ziemlich gute Übereinstimmung zeigen (Die Versuchsanlage war nicht für Präzisionsmessungen ausgelegt, sondern sollte qualitativ die vermuteten Zusammenhänge bestätigen), dass jedoch für Helium ein grösserer Unterschied auftritt. Dieser kann wahrscheinlich dadurch erklärt werden, dass selbst nach mehrfachem Spülen mit Helium und Evakuieren das Gasspalttes (allerdings in kaltem Zustand) immer noch Fremdgase zurückbleiben, die die Wärmeleitung durch den Gasspalt verminderten. Allgemein musste festgestellt werden, dass die durch Messungen ermittelte Wärmeleitfähigkeit des Heliums ungefähr 20 bis 30% unter der in der Literatur angegebenen lag. Das verwendete Helium hatte eine Reinheit von 99,995%.

Abbildung 5 : Temperatur der inneren geheizten Wand als Funktion des Vakuums im Gasspalt bei konstanter Heizleistung. Die Darstellung zeigt das Ansteigen der Wandtemperatur mit steigendem Vakuum. Für drei Ausgangstemperaturen (50°C, 150°C und 250°C) bei atmosphärischem Druck und bei jeweils konstanter Heizleistung erkennt man, dass im Fall von Helium der Temperaturanstieg schon bei höherem Druck erfolgt als im Fall von Luft, und dass für eine höhere Ausgangstemperatur der Temperaturanstieg bei beiden Gases ebenfalls bei höherem Druck beginnt.

Beide Erscheinungen lassen sich aus dem theoretischen Zusammenhang voraussagen : die erste wegen der unterschiedlichen Gaskennwerte von Helium und Luft, die zweite auf Grund der höheren mittleren Gastemperatur und des kleineren Gasspaltess bei höherer Temperatur (relative Wärmedehnung der konzentrischen Rohre). Zur Verdeutlichung der genannten Erscheinungen dient die folgende Tabelle, in der für zwei verschiedene Ausgangstemperaturen (50°C und 150°C) das erforderliche Vakuum jeweils für Luft und Helium angegeben ist, um eine Verdopplung der Wandtemperatur bei konstanter Heizleistung herbeizuführen.

- Ausgangstemperatur bei 760 torr	:	50°C	150°C
- Endtemperatur (Verdopplung der Ausgangstemperatur)	:	100°C	300°C
- Druck im Gasspalt zum Erreichen der Endtemperatur			
	für Luft	:	1,3 torr 2,3 torr
	für Helium	:	4,2 torr 12,5 torr

Abbildung 6 : Wärmeleitfähigkeit des Gases bei niedrigem Druck (Vakuum) im Vergleich zur Wärmeleitfähigkeit bei atmosphärischem Druck. Die Darstellung zeigt das Verhältnis der Wärmeleitfähigkeiten als Funktion des Unterdruckes im Gasspalt und gibt den Vergleich der Messwerte mit den theoretisch errechneten Werten gemäss der Gleichung (9). Es ist hier deutlich zu erkennen, dass die Wärmeleitfähigkeit mit fallendem Druck abnimmt, und dass die Mess- und Rechenwerte eine gute systematische Übereinstimmung zeigen. Die Unterschiede zwischen beiden Werten können verschiedenartige Ursachen haben, sind aber in der Hauptsache wahrscheinlich auf Unzulänglichkeiten der Versuchsanordnung zurückzuführen, wie z.B. in Bezug auf Leistungsmessung (Wärmeverluste), Temperaturmessung, Vakuummessung, Abstand der konzentrischen Wände, Gasreinheit etc.

Es muss in dem Zusammenhang betont werden, dass die Versuche nicht zum Ziel hatten, die exakte Bestätigung der theoretischen Werte zu finden, sondern die Richtigkeit des allgemeinen Verhaltens der Gase zu zeigen, um als gesicherte praktische Grundlage dienen zu können.

4.2. Betriebsverhalten.

Nach den Versuchen über das grundsätzliche wärmetechnische Verhalten der Versuchsanordnung sollte eine zweite Reihe von Messungen Auskunft geben über die betriebstechnischen und regeltechnischen Eigenschaften des Systems. Dabei wurde von der Überlegung ausgegangen dass die Versuchsbedingungen in erster Linie den am Reaktor BR2 gegebenen Verhältnissen zu entsprechen hätten.

Es galt hier vor allem, die geometrischen Bedingungen zu simulieren, den Regelbereich hinsichtlich Schwankungen der Wärmeproduktion und Konstanzhaltung der Betriebstemperatur zu untersuchen sowie den Einfluss von Betriebsstörungen kennenzulernen.

Die Ergebnisse der Versuche können folgendermassen zusammengefasst werden :

4.2.1. Geometrischer Aufbau.

Die Abbildung 2 zeigt schematisch den Aufbau der Versuchsanlage entsprechend den am BR2 gegebenen Bedingungen. Charakteristisch hierbei ist die lange Rohrleitung, die den konzentrischen Gasspalt mit der Kontrollwarte für die Vakuumregelung verbindet. Dieses Rohrleitungssystem besitzt innere Durchmesser von einigen bis mehreren Millimetern und umschliesst ein Volumen von ungefähr 5 dm³.

Geht man davon aus, dass es bei Bestrahlungsversuchen im allgemeinen voll ausreichend ist, wenn man die Wärmeleitfähigkeit der Wärmeisolierung (Gasspalt) um den Faktor 5 verändern kann, so lässt sich mit Hilfe der Abbildung 1 feststellen, dass der hierfür im Gasspalt erforderliche Druck im Bereich von 0,1 bis mehreren Torr liegt. Wie sich vermuten lässt, und was auch durch die Versuche bestätigt wurde, genügt es, dass die Verbindungsrohre einen Durchmesser von nur einigen Millimetern besitzen, um das erforderliche Vakuum in verhältnismässig kurzer Zeit zu erzeugen oder zu verändern in einem Volumen von einigen Litern. Erst unterhalb eines Vakuums von 0,1 Torr stösst man auf immer länger dauernde Evakuationszeiten infolge des wachsenden Widerstandes der kleinen Rohrleitungen.

Bei der beschriebenen Versuchsanlage konnte durch volles Öffnen des Drosselventils vor der Vakuumpumpe der Gasdruck im konzentrischen Gasspalt von 760 Torr auf den Bereich 0,1 Torr innerhalb einer Zeit von weniger als einer Minute gesenkt werden. Diese Zeitangabe verdeutlicht, dass es kein Problem darstellt, das erforderliche Vakuum in einem ausgedehnten Rohrleitungssystem von kleinen Durchmessern zu erzeugen. Es ist im Gegenteil zu beachten, dass das Evakuieren gedrosselt wird, um den Temperaturanstieg nicht zu schnell geschehen zu lassen

4.2.2. Regelverhalten.

Wie unter Punkt 3. beschrieben, wirkt die Temperaturmessung der Probe auf den Öffnungsgrad des Gaszuführungsventils ein. Steigt die Temperatur der Probe über den gegebenen Sollwert, so öffnet das automatische Regelventil etwas mehr, erhöht den Gasdruck im Isolationsspalt und bringt durch die verbesserte Wärmeleitfähigkeit die Temperatur der Probe wieder zum Sinken. Im Falle einer zu niedrigen Temperatur der Probe läuft der umgekehrte Vorgang ab.

Man kann hier die Frage stellen, ob das Regelsystem nicht zu dauernden Schwingungen neigt, und ob bei mehr oder weniger schnellen Änderungen der Wärmeerzeugung das Regelsystem in der Lage ist, die gewünschte Temperatur zu halten. Beide Fragen wurden im Versuch geprüft, und es konnte festgestellt werden, dass sich der PID-Regler in Abhängigkeit vom jeweiligen Vakuum betriebsniveau so einstellen lässt, dass sowohl Schwingungen gut gedämpft als auch Änderungen der Wärmeproduktion gut ausgeglichen werden. In Abbildung 7 sind die Ergebnisse der Versuche -Temperaturverlauf in Funktion der Zeit- dargestellt.

Es ist zu erwähnen, dass Änderungen der Wärmeerzeugung in der Probe bei der Bestrahlung im Reaktor normalerweise nur sehr langsam ablaufen. Wie der Bestrahlungsversuch im BR2-Reaktor gezeigt hat, haben diese langsamen Änderungen der Wärmeproduktion keinen Einfluss auf die Konstanz der Proben temperatur, die von dem Regelsystem über mehrere Wochen Bestrahlungsdauer mühelos ohne Schwankungen eingehalten werden konnte.

Im allgemeinen lässt sich feststellen, dass durch eine geeignete Abstimmung der Bauelemente wie Gaszuführventil, Gasabfuhrventil, Vakuumpumpe, Rohrleitungsvolumen etc, ein gutes Regelverhalten erzielt werden kann. Die Grenzen jedoch liegen bei höherem Vakuum (kleiner 0,1 Torr) und plötzlichem Verändern der Wärmeerzeugung.

4.2.3. Betriebsstörungen.

Abgesehen von fehlerhaftem Funktionieren der apparativen Einrichtung, ist der Verlust der Vakuumdichtheit als eine für die Anlage charakteristische Betriebsstörung anzusehen. Man kann hierbei zwei Fälle unterscheiden, dass nämlich die Regelanlage mit Luft als Wärmeüberträger arbeitet oder dass ein Gas mit höherer Wärmeleitfähigkeit als die der Luft (z.B. Helium) verwendet wird.

Im ersten Fall wird das Eindringen der Umgebungsluft durch Leckstellen eine Temperaturverringerung der geheizten Probe verursachen, wenn die Leckmenge die Absaugekapazität der Vakuumpumpe übersteigt. Eine solche Situation ist unangenehm, kann aber vom Sicherheitsstandpunkt aus akzeptiert werden, da eine Überhitzung der Proben vermieden wird.

Im zweiten Fall, Betrieb mit Helium, würde das Eindringen schon von geringen Luftmengen schliesslich zu einer Erhöhung der Proben temperatur führen. Eine Überhitzung der Proben jedoch lässt sich auch hier vermeiden durch die Erhöhung des Heliumdruckes im Isolationspalt. Die hierzu durchgeführten Versuche sind in Abbildung 8 mit ihren Ergebnissen dargestellt

Beim Eindringen von Wasser, wie es bei Bestrahlungsversuchen in wassergekühlten Reaktoren der Fall sein kann, kann ebenfalls durch die Erhöhung des Heliumdruckes das Wasser wieder verdrängt werden. Die für den BR2 gebaute Versuchsanlage besitzt zu diesem Zweck einen Wasserdetektor, der den Sicherheitsvorgang automatisch in die Wege leitet

In allen Fällen des Verlustes der Vakuumdichtheit der Anlage ist jedoch die ordnungsgemässe Temperaturregelung mehr oder weniger stark gestört und der Versuch muss den jeweiligen Umständen entsprechend, nach kürzerer oder längerer Übergangszeit unterbrochen werden, falls eine Reparatur der Leckstelle nicht gelingt. Es ist jedoch auch zu bemerken, dass eine Anlage, die gemäss einer guten Vakuumtechnik konstruiert und geprüft worden ist, ihre Vakuumdichtheit sehr gut beibehält, da die Materialbelastung im Vergleich zu einer Anlage unter Druck wesentlich günstiger ist. Dies wurde bei den durchgeführten Versuchen bestätigt, wo bei der Anlage über viele Monate hinweg keine störenden Undichtheiten auftraten. Es wurde in diesem Zusammenhang gefunden dass die Leckdichtheit der Anlage mindestens 10^{-3} torr·l/s betragen sollte, um jegliche Störung auf die Temperaturregelung auch über lange Zeiträume auszuschliessen.

5. Anwendungen.

Wie eingangs schon erwähnt, lässt sich die Anwendung des beschriebenen Temperaturregelverfahrens ganz allgemein sowohl in der Wärme- wie auch in der Kältetechnik denken. In der vorliegenden Arbeit jedoch wurden seine Eigenschaften im besonderen für den Gebrauch bei Bestrahlungsversuchen geprüft. Hierbei ist ein Vergleich mit einem anderen häufig verwendeten Verfahren angebracht, das darauf beruht, die Wärmeleitfähigkeit des konzentrischen Gasspalttes mit Hilfe der Mischung von zwei Gasen unterschiedlicher Leitfähigkeit zu verändern. Dieses Verfahren arbeitet mit Gasen (z.B. Helium und Neon) unter beliebigem Druck und erfordert eine ständige Durchspülung des Gasspalttes.

Der prinzipielle Unterschied der beiden Verfahren liegt darin, dass bei gleicher Dicke des Gasspalt es im ersten Fall die Leitfähigkeit des Heliums durch Unterdruck gesenkt wird, während im zweiten Fall die gewünschte Verringerung der Wärmeübertragung durch Beimischung eines Gases schlechterer Leitfähigkeit (z.B. Neon, Stickstoff) bewirkt wird. Zum besseren Verständnis muss betont werden, dass der Gasspalt in beiden Fällen die gleiche Stärke besitzt, da ja davon ausgegangen wird, dass das Füllen des Gasspalt es mit dem am besten leitenden Gas eine zu niedrige Temperatur der Proben hervorruft. Die gewünschte Betriebstemperatur der Proben wird dann durch Evakuieren bzw. durch Beimischung des schlechter leitenden Gases erzielt.

Vergleicht man die Eigenschaften der beiden Temperaturregelverfahren miteinander, hinsichtlich ihrer Verwendung bei Bestrahlungsversuchen, so lässt sich über die Vakuumtemperaturregelung folgendes aussagen

- Sie besitzt einen wesentlich grösseren Regelbereich.
- Sie vermeidet eine ständige Zirkulation von möglicherweise radioaktiven Gasen ausserhalb des Reaktorbehälters.
- Ihr Gasverbrauch ist minimal.
- Sie vermeidet die dauernde Zufuhr von möglicherweise korrosiven Gasverunreinigungen zu der Probekapsel.
- Sie erlaubt eine ständige Dichtheitskontrolle des gasführenden Systems.
- Sie verhindert das Austreten von möglicherweise schädlichen Gasen in die Umgebung.
- Die Konstruktion der Anlage und die Automatisierung der Regelung ist einfacher.
- Die Störzeiten des Regelsystems sind verhältnismässig kurz und eine fehlerhafte Überhitzung der Proben kann in kürzester Zeit verhindert werden.
- Der Bestrahlungseinsatz ist durch nur eine Gasleitung mit der Kontrollwarte verbunden.

Gegenüber den erwähnten Vorteilen der Vakuumtemperaturregelung im Vergleich mit der Gasgemischtemperaturregelung steht der Nachteil, dass ihr gutes Funktionieren von einer guten Leckdichtheit des Vakuumsystems abhängt. Dies hat zur Folge, dass beim Auftreten von kleinen Leckstellen, die nicht sofort repariert werden können, der Versuch verhältnismässig frühzeitig unterbrochen werden muss. Dagegen erlaubt die Gasgemischtemperaturregelung eine längere Fortsetzung des Versuches, wenn die Leckmenge nicht zu grob ist.

Ob diese Unzulänglichkeit der Vakuumtemperaturregelung von schwerwiegender Bedeutung ist, hängt von den jeweiligen Versuchsbedingungen ab. Die Erfahrung mit der Regelanlage hat jedoch gezeigt, dass ein Überhitzen der Versuchskapsel schnell und zuverlässig vermieden werden kann, und dass die einmal verwirklichte und geprüfte Leckdichtheit des Vakuumsystems über mehrer Betriebsmonate hinweg nicht verloren geht. Die Regелеigenschaften des Temperaturkontrollsystems wurden in keiner Weise durch die lange Betriebszeit verändert und waren zu jedem Zeitpunkt reproduzierbar.

Nachwort.

Der Verfasser dankt allen, die ihre Unterstützung und Mitarbeit für den Bau der Regelanlage und die Durchführung der Versuche gegeben haben. Besonders erwähnt seien dabei Herr PLANQUART, Leiter der Abteilung Technologie des CEN, Herr MATHIEU, Leiter der Unterabteilung Instrumentierung, und Herr HERMANS, Mitarbeiter des Verfassers.

Die Arbeiten sind im CEN, MOL, durchgeführt worden im Rahmen des zwischen EURATOM und CEN geschlossenen Assoziationsvertrages zum Betreiben des Forschungsreaktors BR2 und der zugehörigen Anlagen.

Das Commissariat à l'Energie Atomique (CEA) in Saclay, Frankreich, hat zu gleicher Zeit mit den hier beschriebenen Versuchen ähnliche Untersuchungen über das gleiche Verfahrensprinzip unabhängig durchgeführt. Im Laufe der Arbeiten kam es zu einem Erfahrungsaustausch zwischen dem CEA und dem CEN.

Literaturverzeichnis

- (I) S. Dushman, J.M. Lafferty :
"Scientific Foundations of Vacuum Technique",
(2nd ed., 1962).
- (II) E. Schmidt
"Einführung in die Technische Thermodynamik",
(7. verbesserte Auflage, 1958).

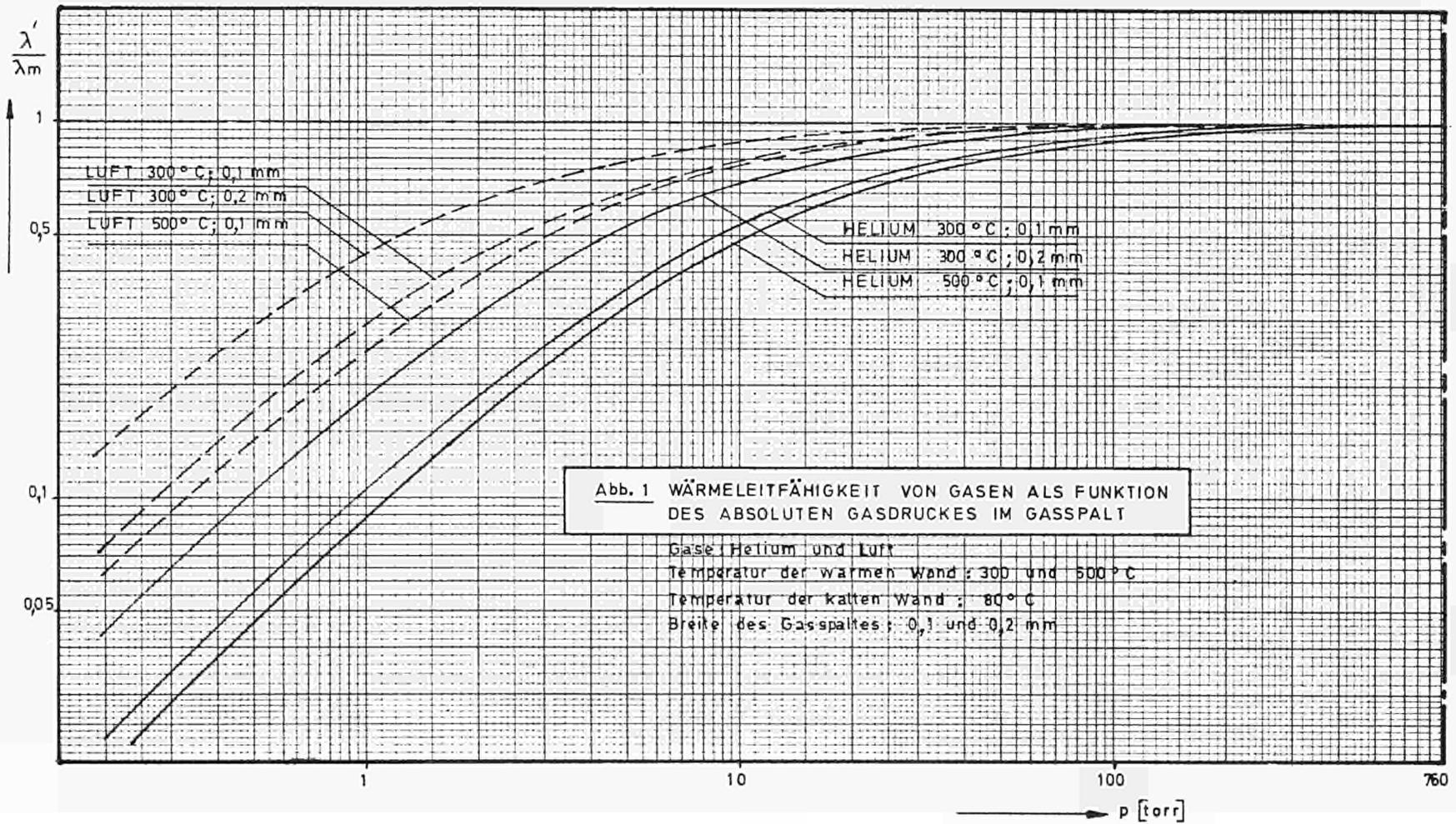
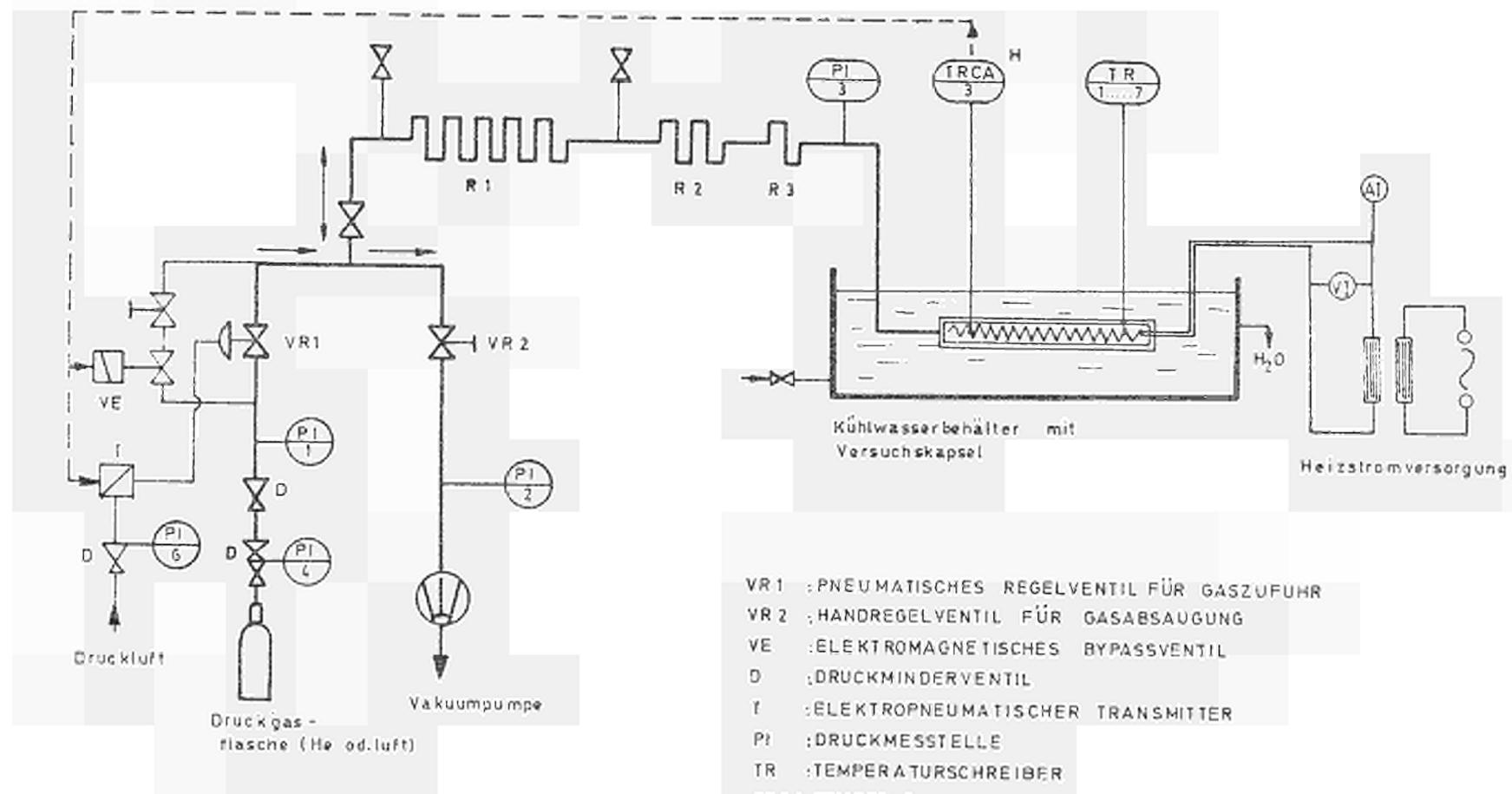


Abb. 1 WÄRMELEITFÄHIGKEIT VON GASEN ALS FUNKTION DES ABSOLUTEN GASDRUCKES IM GASSPALT

Gase: Helium und Luft
 Temperatur der warmen Wand: 300 und 500 °C
 Temperatur der kalten Wand: 80 °C
 Breite des Gasspalt: 0,1 und 0,2 mm



- VR1 : PNEUMATISCHES REGELVENTIL FÜR GASZUFUHR
- VR2 : HANDREGELVENTIL FÜR GASABSAUGUNG
- VE : ELEKTROMAGNETISCHES BYPASSVENTIL
- D : DRUCKMINDERVENTIL
- T : ELEKTROPNEUMATISCHER TRANSMITTER
- PI : DRUCKMESSTELLE
- TR : TEMPERATURSCHREIBER
- TRCA: TEMPERATURREGEL - UND ALARMEINHEIT
- R1 : ROHRLEITUNG \varnothing 10 x 25000mm
- R2 : ROHRLEITUNG \varnothing 22 x 5000 mm
- R3 : ROHRLEITUNG \varnothing 16 x 300 mm

Abb. 2 SCHEMATISCHER AUFBAU DER VERSUCHSANLAGE

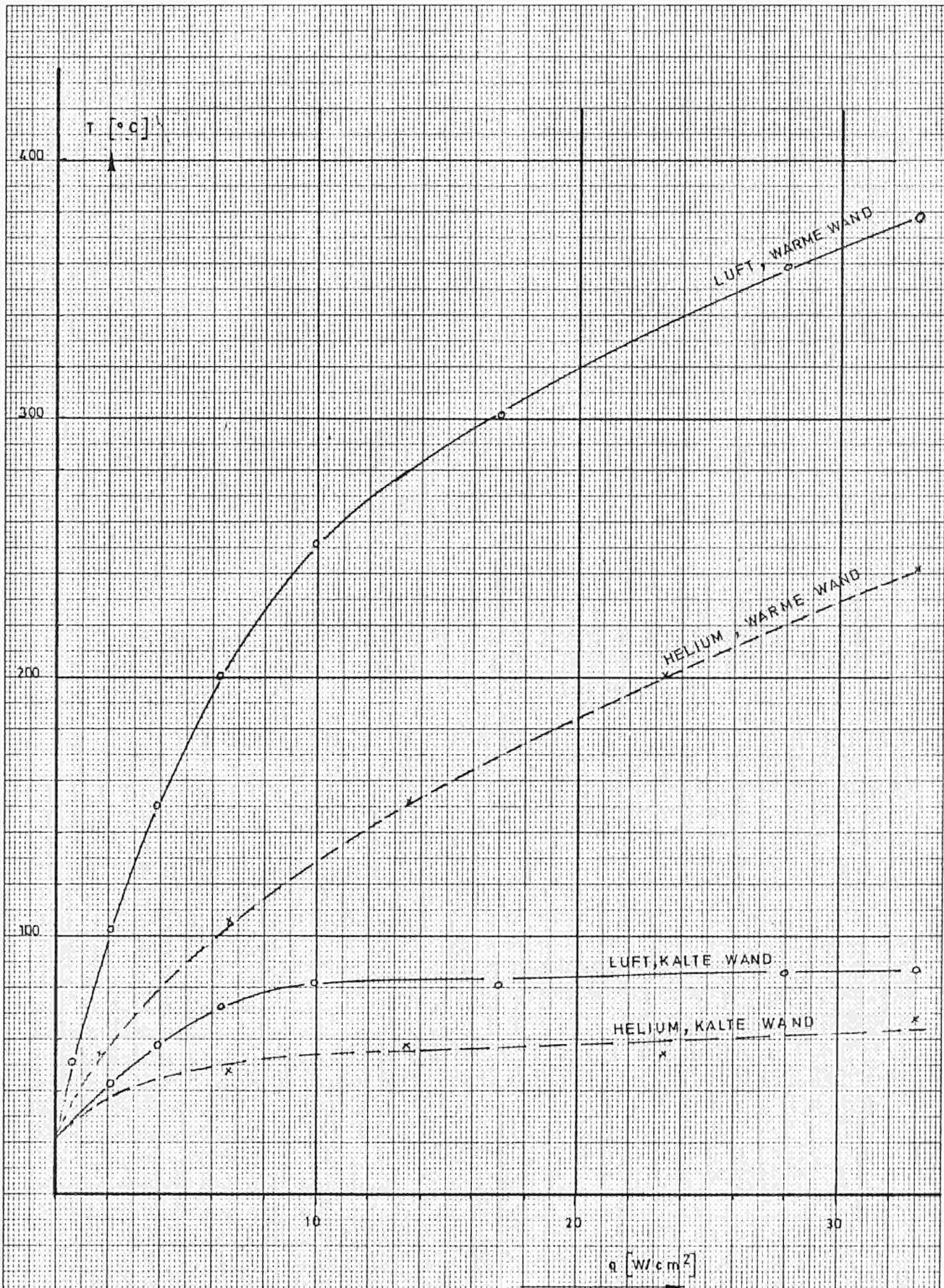


Abb. 3 TEMPERATUR DER BEIDEN KONZENTRISCHEN WÄNDE ALS FUNKTION DES WÄRMEFLUSSES

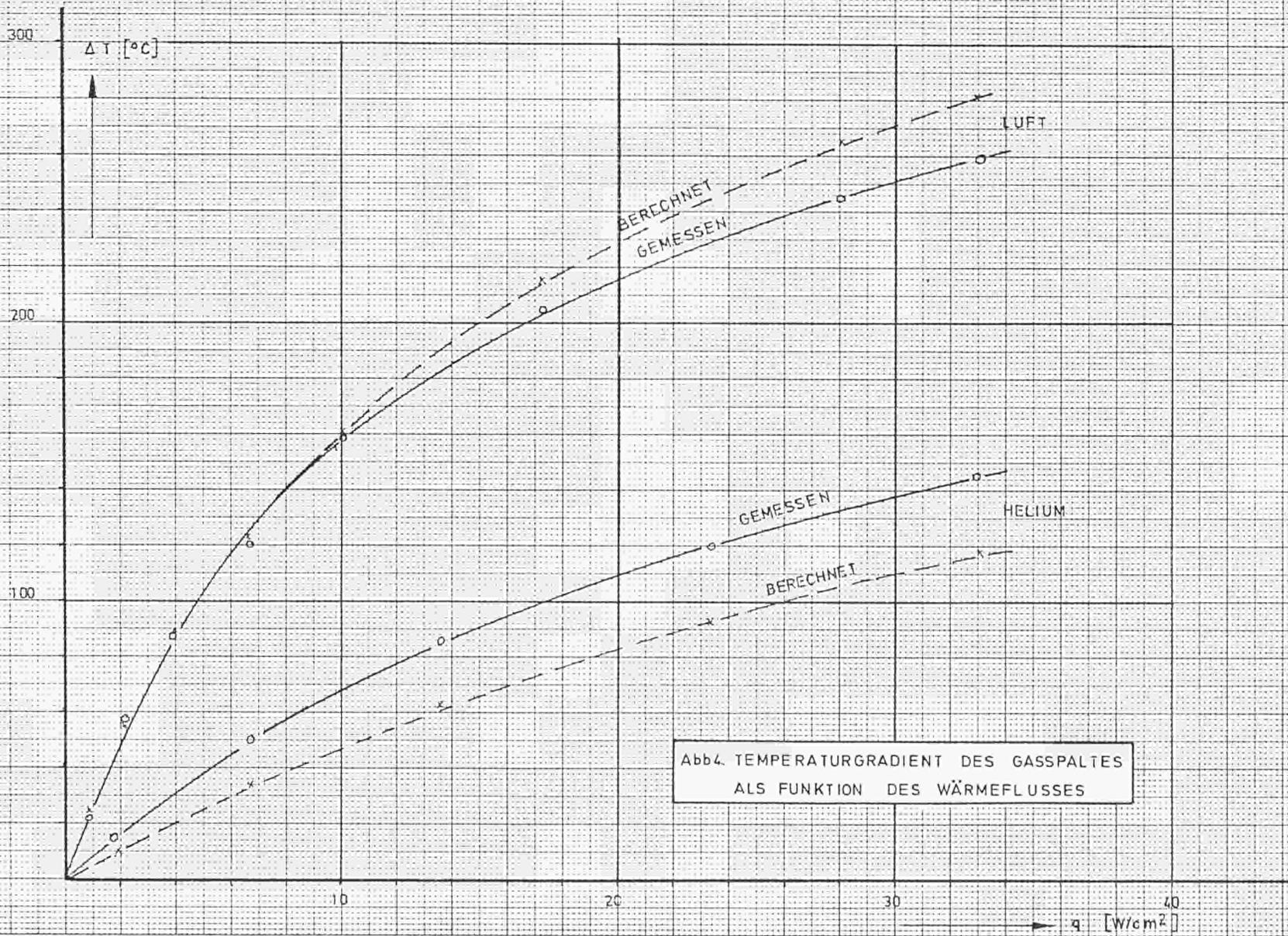


Abb4. TEMPERATURGRADIENT DES GASSPALTES
ALS FUNKTION DES WÄRMEFLUSSES

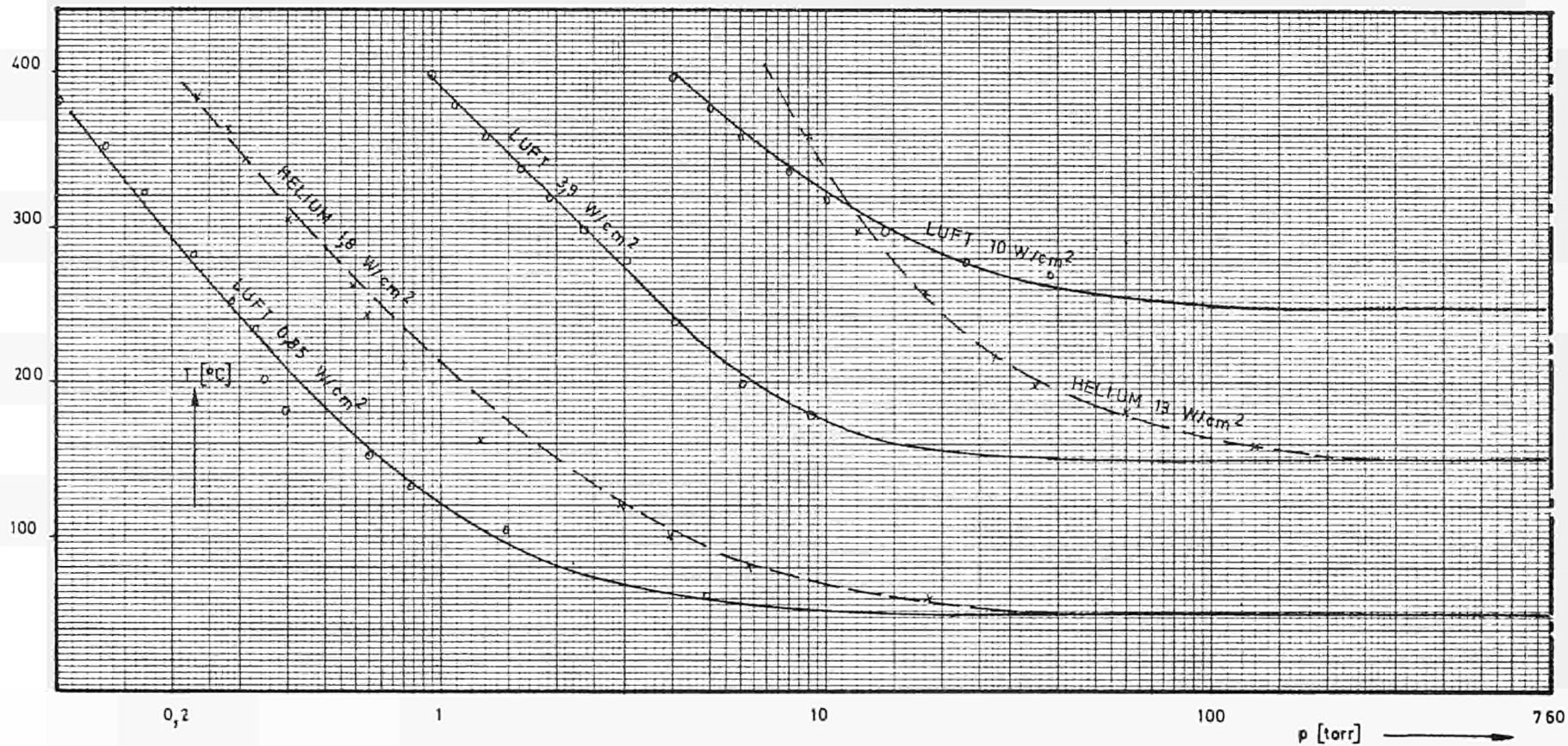
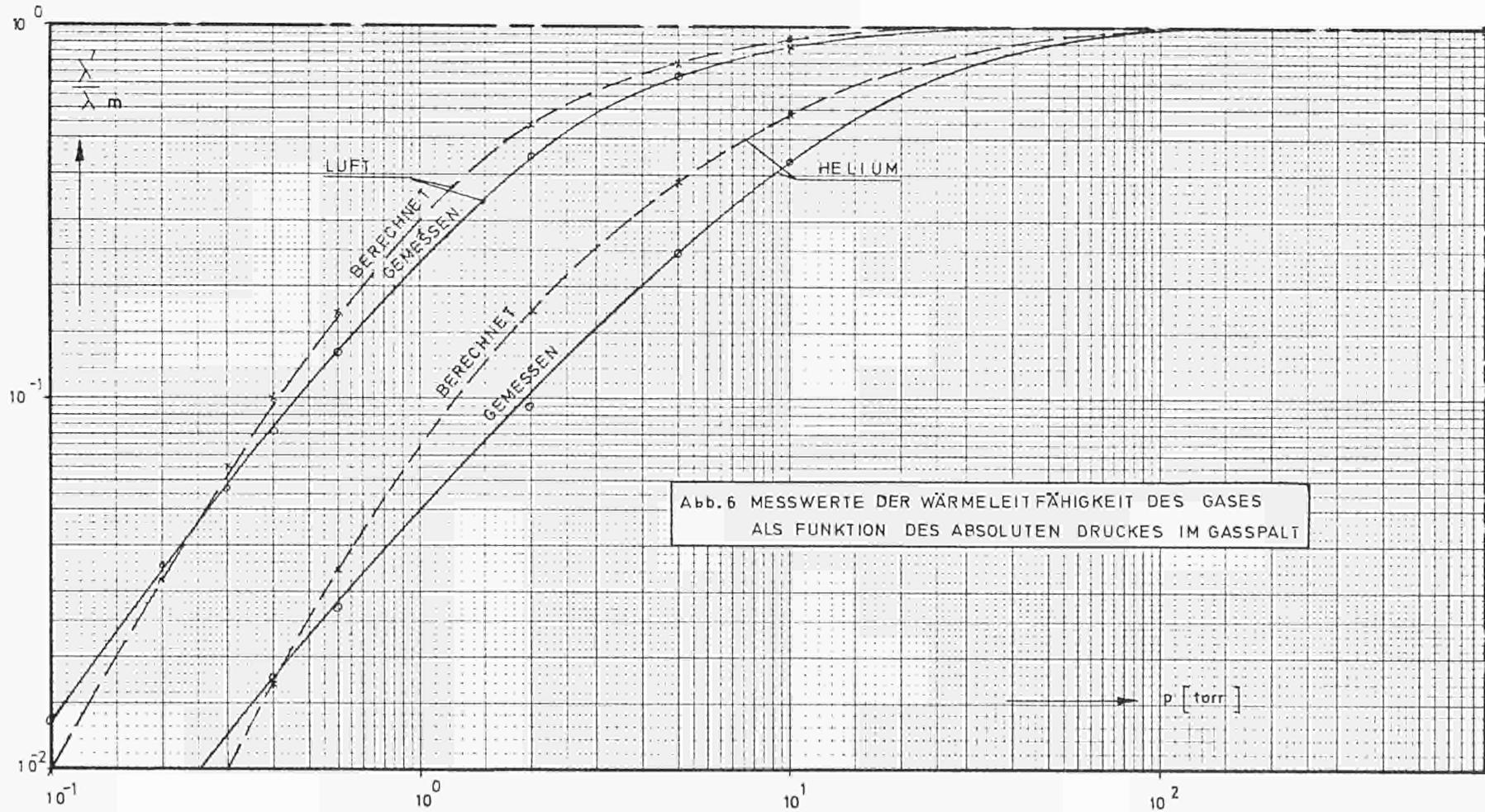
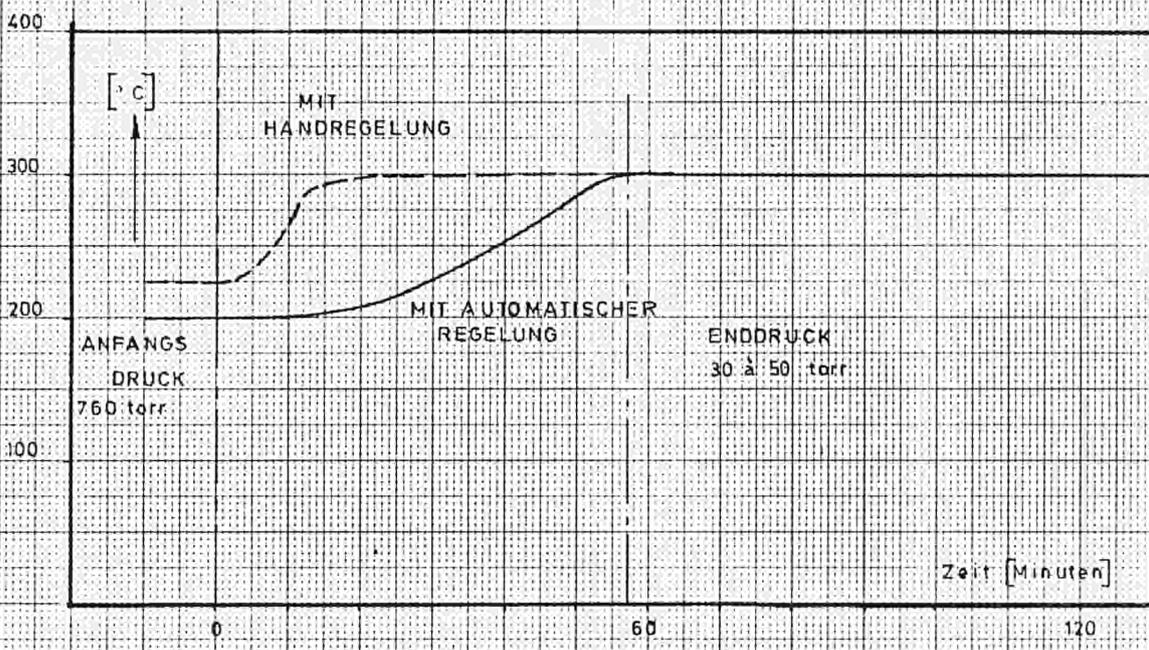


Abb.5 TEMPERATUR DER GEHEIZTEN WAND
ALS FUNKTION DES ABSOLUTEN DRUCKES IM GASSPALT





EINREGELUNG DER SOLLTEMPERATUR VON 300 °C IN FUNKTION DER ZEIT

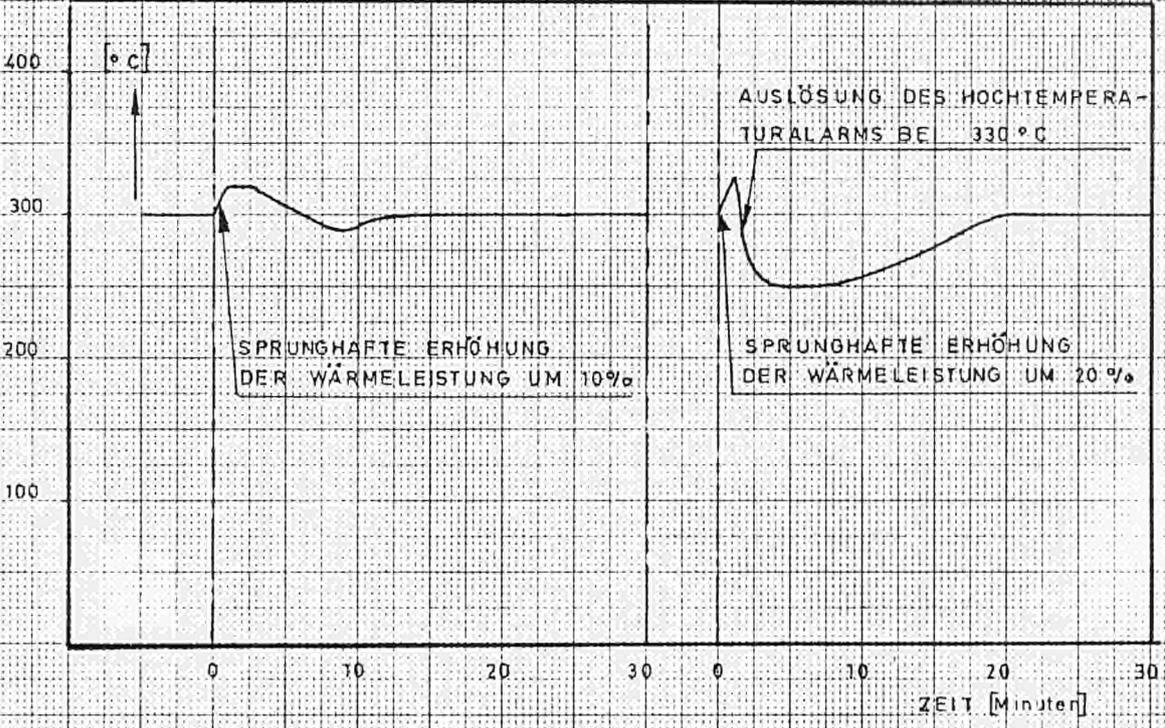
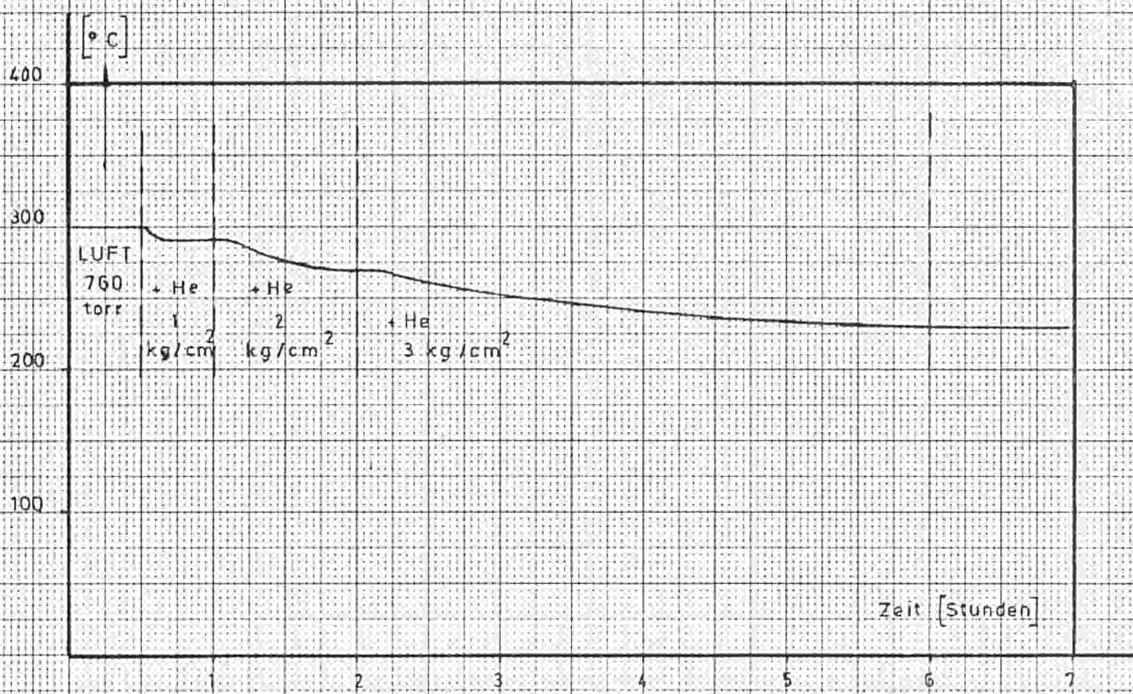
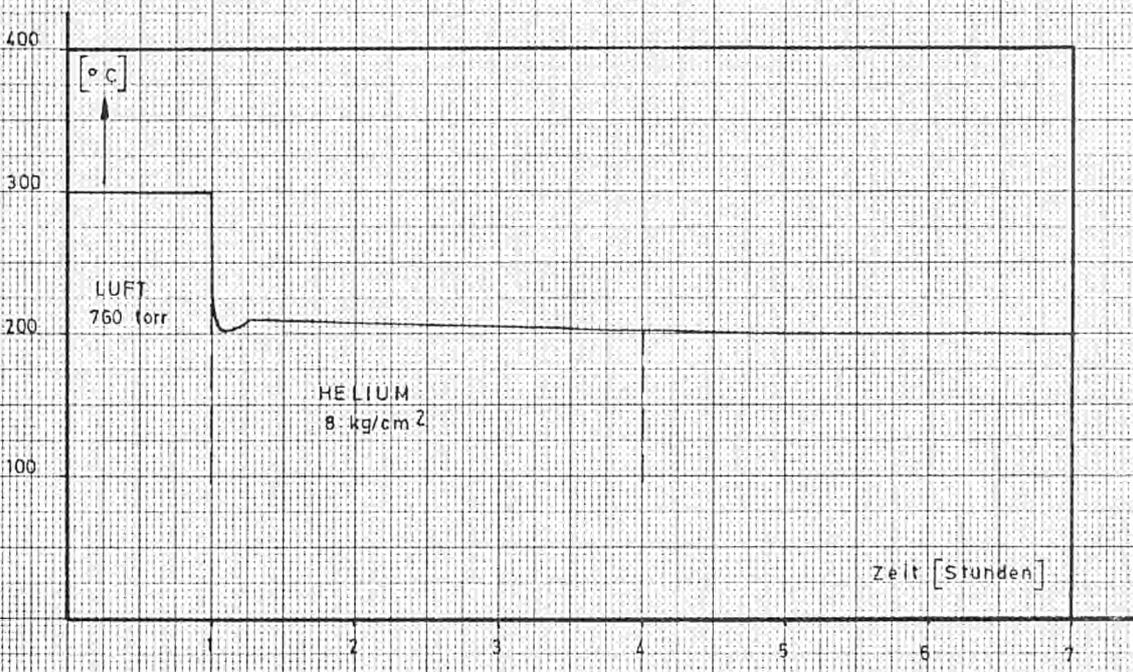


Abb 7. ZEITLICHER TEMPERATURVERLAUF DER GEHEIZTEN WAND BEI ÄNDERUNG DER BETRIEBSBEDINGUNGEN



TEMPERATUR DER GEHEIZTEN WAND BEI STUFENWEISER UNTERDRUCKSETZUNG MIT HELIUM DES LUFTGEFÜLLTEN SPALTES



TEMPERATUR DER GEHEIZTEN WAND BEI PLÖTZLICHER UNTERDRUCKSETZUNG MIT HELIUM DES LUFTGEFÜLLTEN SPALTES

Abb. 8 ZEITLICHER TEMPERATURVERLAUF DER GEHEIZTEN WAND BEI ÄNDERUNG DER BETRIEBSBEDINGUNGEN

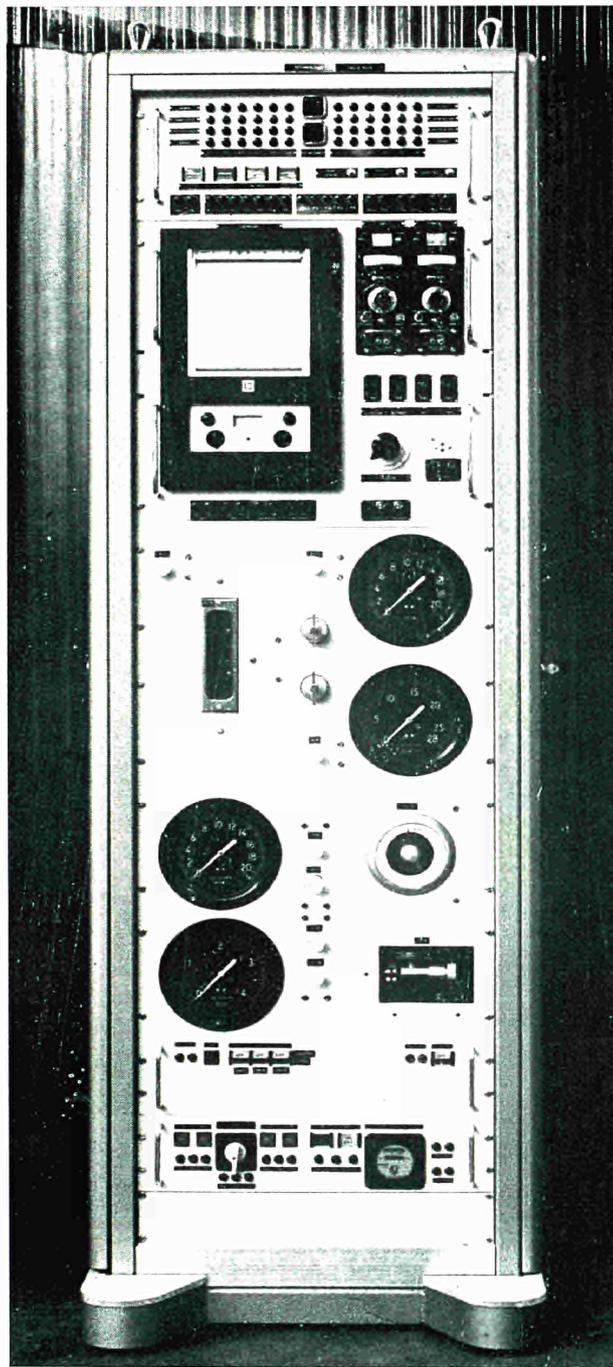


Abbildung 9 : Photographie der Temperaturkontrollwarte.

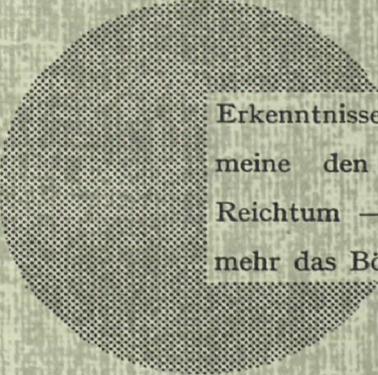
AN UNSERE LESER

Alle Wissenschaftliche und technische Berichte werden nach Erscheinen in der von der Zentralstelle für Information und Dokumentation (CID) herausgegebenen Monatszeitschrift "euro abstracts", angezeigt. Abonnement (1 Jahr : DM 60, BF 820) und Probehefte sind erhältlich bei :

Handelsblatt GmbH
"euro abstracts",
Postfach 1102
D 4 Düsseldorf 1 (Germany)

oder

Office de vente des publications officielles
des Communautés européennes
37, rue Glesener
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 von der Kommission der Europäischen Gemeinschaften veröffentlichten 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 Umschlagseite jedes Berichts stehen, deutlich angeben.

VERTRIEBSSTELLE DER AMTLICHEN VERÖFFENTLICHUNGEN DER EUROPÄISCHEN GEMEINSCHAFTEN

37, rue Glesener, Luxembourg (Compte chèque postal N° 191-90)

BELGIQUE — BELGIË

MONITEUR BELGE
Rue de Louvain, 40-42 - 1000 Bruxelles
BELGISCH STAATSBLAD
Leuvenseweg 40-42 - 1000 Brussel

LUXEMBOURG

OFFICE DE VENTE
DES PUBLICATIONS OFFICIELLES
DES COMMUNAUTÉS EUROPÉENNES
37, rue Glesener - Luxembourg

DEUTSCHLAND

BUNDESANZEIGER
Postfach - 5000 Köln 1

NEDERLAND

STAATSDRUKKERIJ
Christoffel Plantijnstraat - Den Haag

FRANCE

SERVICE DE VENTE EN FRANCE
DES PUBLICATIONS DES
COMMUNAUTÉS EUROPÉENNES
26, rue Desaix - 75 Paris 15°

ITALIA

LIBRERIA DELLO STATO
Piazza G. Verdi, 10 - 00198 Roma

UNITED KINGDOM

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

Kommission der
Europäischen Gemeinschaften
G.D. XIII - C.I.D.
29, rue Aldringer
L u x e m b o u r g

CDNA04478DEC