

DESE BIBLIOTHEK  
IN MÜNCHEN

Das Buch ist Eigentum der Bibliothek der Universität München

von

Wulfwin Bartel  
Wolfgang Kolster



Der vorliegende Bericht über den Aufbau und die Funktion des Wasserstofftargetes  
ger Gruppe F22 bei DESY enthält im Hauptteil die nur unwesentlich gekürzte  
Diplomarbeit von Herrn W. Kolster. Im Anhang befindet sich eine ausführliche  
Bedienungs- und Wartungsanleitung.



## INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
I.1 Targettypen	1
I.2 Voraussetzungen für den Bau des Targets	2
II. AUFBAU UND FUNKTIONSWEISE DES TARGETS	4
II.1 Kryogenerator	4
1.1 Der Philips-Stirling-Zyklus	4
1.2 Wirkungsgrad	5
II.2 Transfersystem	7
II.3 Kryostat und Streukammer	7
II.4 Füll- und Kontrollstand	8
4.1 Anordnung und Schaltung der Ventile	9
4.2 Kontrolleinheiten	10
III. TEMPERATURMESSUNGEN AM KYROSTATEN	10
III.1 Messverfahren	11
1.1 Wahl der Thermoelemente	11
1.2 Anordnung der Thermoelemente	11
1.3 Auslese der Spannungswerte	12
III.2 Fehlerabschätzung für die Temperaturmessung	12
III.3 Zeitlicher Verlauf der Temperatur	13
III.3.1 Abkühlvorgang	13
3.2 Aufwärmvorgang	15
IV. AUSWERTUNG DER TEMPERATURMESSUNGEN	17
IV.1 Der stationäre Zustand	17
1.1 Berechnung der Wärmemenge im stationären Zustand	17
1.2 Charakterisierung des numerischen Verfahrens zur Berechnung der Wärmemenge	18
1.3 Der Fehler des numerischen Verfahrens	18
1.4 Ergebnisse und Folgerungen	19
IV.2 Wärmeabgabe und Wärmeaufnahme des Kryostaten im nichtstationären Zustand	22

	Seite
IV.2.1 Das numerische Verfahren	22
2.2 Wärmeabgabe	23
2.3 Wärmeaufnahme	24
IV.3 Temperaturabhängigkeit der Wärmeaufnahme	25
IV.4 Bestimmung der Dichte des flüssigen Wasserstoffs in der Zelle	26
IV.4.1 Berechnung der in der Zeiteinheit ver- dampfenden Menge Wasserstoff	27
4.2 Berechnung des Emissionskoeffizienten der Zelle	27
4.3 Bestimmung des Korrekturfaktors zur Wasserstoffdichte	28
V. DIE DIFFERENTIALGLEICHUNG DER WÄRMELEITUNG	30
V.1 Das numerische Verfahren	30
V.1.1 Die allgemeine Form der Differentialgleichung	30
1.2 Vereinfachung der Differentialgleichung	31
1.3 Das gewöhnliche Differenzverfahren	31
1.4 Test des numerischen Verfahrens	32
1.5 Berechnung der $A_{i,j}$	32
1.6 Ergebnisse und Diskussion	33
VI. ZUSAMMENFASSUNG	33
Literaturverzeichnis	35
Danksagung	36
Verzeichnis der Abbildungen	37
Anhang	

## I.1 Targettypen

Es ist zwischen folgenden Targettypen, die flüssigen Wasserstoff benutzen, zu unterscheiden:

(1) Target mit Wasserstoffreservoir (Abb. 1a):

Die Zelle ist direkt mit einem Wasserstoff-Vorratsbehälter von etwa 5 l Inhalt verbunden. Die Nachteile dieser Anordnung sind:

(a) Die im Vorratsbehälter enthaltene Wasserstoffmenge ist nur durch die H-Folie der Zelle vom Vakuum der Streukammer getrennt. Bei einem Defekt der Zelle verdampft der gesamte Wasserstoff explosionsartig ins Vakuum.

(b) Das aus dem Vorratsbehälter verdampfende Gas geht im allgemeinen verloren. Dieses Target ist also aus finanziellen Gründen nicht für Deuterium geeignet.

(2) Kondensationstarget mit flüssigem Wasserstoff als Kühlmittel (Abb. 1b): Der Wasserstoff-Vorratsbehälter und die Zelle sind zwei getrennte Systeme. Der Wasserstoff im Vorratsbehälter dient zur Kühlung eines Wärmeaustauschers, durch den gasförmiger Wasserstoff unter einem Druck von etwa 1,1 - 1,4 atm zur Füllung der Zelle gedrückt wird. Es kann auch Deuterium verwendet werden. Die Nachteile dieser Anordnung sind:

(a) Ein hoher Wasserstoffverbrauch beim Einkondensieren.

(b) In unmittelbarer Nähe des Targets muss ein grösserer Vorrat Wasserstoff aufgehoben werden, damit während des Betriebs Wasserstoff nachgefüllt werden kann. Aus Sicherheitsgründen verwenden deshalb einige Laohrs Helium als Kühlmittel. Die Rückgewinnung des Heliums ist jedoch aufwendig.

(3) Kondensationstarget mit Fremdkühlung durch ein Gasumlaufsystem (Abb. 1c): Zur Erzeugung der Kühleistung dient ein Kryogenerator. Die Kälte wird über ein mit Heliumgas gefülltes Transfersystem zum Wärmeaustauscher des Targets transportiert. Die benötigte Menge Wasserstoff reduziert sich auf den Zelleninhalt. Dieses Target er-

fordert demnach weniger aufwendige Sicherheitsvorkehrungen.

Das in dieser Arbeit beschriebene Target gehört zum Typ (3).

Zur Erzeugung der Kühlleistung wird eine Philips Kältemaschine vom Typ PGH-105 benutzt.

### 1.2 Voraussetzungen für den Bau des Targets

Zunächst wird untersucht, welche Aufgaben das Target zu erfüllen hat.

(1) Zur Bestimmung der Zahl der Untergrundereignisse wird der flüssige Wasserstoff aus der Zelle in ein Reservoir des Kryostaten gedrückt. Die Zelle bleibt dabei mit Wasserstoffgas gefüllt. Die Grösse des Kryostaten wird dadurch bestimmt, dass Zellen bis zu einem Volumen von etwa  $100 \text{ cm}^3$  benutzt werden.

(2) Es soll Wasserstoff und Deuterium in schnellem Wechsel verwendet werden können. Dabei bestimmt die Grösse der am Target zur Verfügung stehenden Kühlleistung, die wiederum von der Wärmeaufnahme des Kryostaten abhängig ist, die zum Wechsel notwendige Zeit. Diese Zeit soll nicht mehr als 30 - 40 min betragen.

(3) Zur Bestimmung eines Wirkungsquerschnittes ist eine möglichst genaue Kenntnis der Dichte des flüssigen Wasserstoffs (Deuteriums) notwendig. Da der Wasserstoff in der Zelle siedet, kann die Dichte durch eine Druckmessung bestimmt werden. Aus dem gemessenen Druck wird die Dichte durch folgende lineare Approximation<sup>2)</sup> berechnet:

$$(a) \text{ Wasserstoff: } \rho_{\text{H}_2} = 0.0748 - 0.004 p$$

$$(b) \text{ Deuterium: } \rho_{\text{D}_2} = 0.1748 - 0.013 p$$

Der Druck wird in [atm] gemessen.

Die Abweichung der linearen Approximation von der experimentellen  $\rho$ - $p$ -Kurve<sup>3)</sup> bleibt unter 1 % innerhalb folgender Temperatur- bzw.



Druckintervalle:

(a) Wasserstoff:  $18^{\circ} - 22^{\circ} \hat{=} 0.5 \leq p \leq 1.6 \text{ atm}$

(b) Deuterium:  $20^{\circ} - 24^{\circ} \hat{=} 0.3 \leq p \leq 1.1 \text{ atm.}$

Der Druck muss in diesen Intervallen durch Regulierung einer Gegenheizung gehalten werden.

(4) Eine Fernsteuerung des Füll- und Kontrollstandes wird ermöglicht durch Verwendung von elektromagnetischen Ventilen.

Tabelle 1

Dampfdruck - Temperatur - Dichte für H<sub>2</sub>

Interpolation  $\rho = 0.0748 - 0.004 p$   
 $[p] = [\text{atm}]$   
 $[\rho] = [\text{g/cm}^3]$

P [atm]	T [°K]	$\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]
0.0453	14	0.07721
0.1164	15	0.07636
0.1931	16	0.07548
0.3018	17	0.07452
0.4492	18	0.07354
0.6421	19	0.07250
0.8870	20	0.07143
1.559	22	0.06899
2.518	24	0.06624
3.824	26	0.06303
5.549	28	0.05922
7.777	30	0.05430

$$\log P = 3.0683 - \frac{55256}{T} - 3.1282 \cdot 10^{-2} \cdot T + 6.6989 \cdot 10^{-4} \cdot T^4$$

T [K]

P = Dampfdruck [atm]

Tabelle 2

Dampfdruck - Temperatur - Dichte für D<sub>2</sub>

---

Interpolation       $\rho = 0.1748 - 0.013 p$   
[p] = [atm]  
[ $\rho$ ] = [g/cm<sup>3</sup>]

P [atm]	T [°K]	$\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]
0.16872	18.71	0.17385
0.19181	19.00	0.17327
0.29057	20.00	0.17123
0.42405	21.00	0.16909
0.59925	22.00	0.16686
0.82353	23.00	0.16451
1.10456	24.00	0.16205
1.45018	25.00	0.15946
1.86843	26.00	0.15673
2.36751	27.00	0.15384
2.95576	28.00	0.15078
3.64163	29.00	0.14752
4.43377	30.00	0.14400

## II. AUFBAU UND FUNKTIONSWEISE DES TARGETS

Die gesamte Anlage des Targets ist in Abb.2 dargestellt. Die verschiedenen Bauelemente: Kryogenerator, Transferleitung, Kryostat und Füllstand werden im folgenden einzeln und in ihren Beziehungen zueinander beschrieben.

### II. 1 Kryogenerator

Der Kryogenerator PGH-105 ist eine nach dem Philips-Stirling-Zyklus arbeitende Kältemaschine mit zweistufiger Expansion. Die Kältemaschine hat zwei Regeneratoren und zwei Kälteaus-tauscher, die unterschiedliche Endtemperaturen erreichen. Die Endtemperatur  $T_{E1}$  des ersten Kälteaus-tauschers wird mit  $60^{\circ} - 80^{\circ}\text{K}$ , die des zweiten Kälteaus-tauschers  $T_{E2}$  mit  $15^{\circ} - 20^{\circ}\text{K}$  angegeben. Die zur Verfügung stehenden Leistungen  $P_{E1}$  und  $P_{E2}$  sind 100 - 200 Watt bzw. 70-100 Watt. Zur Kühlung des Targets wird nur der zweite Kälteaus-tauscher benutzt.

#### II.1.1 Der Philips-Stirling -Zyklus

Der Philips-Stirling-Zyklus<sup>4)</sup> ist ein Kreisprozess, bei dem Arbeitgas (Helium) abwechselnd komprimiert und expandiert wird. Die Kompression findet bei Raumtemperatur statt, die Expansion bei tieferen Temperaturen. Dieses wird möglich durch die Anordnung von Regeneratoren zwischen dem Kompressionsraum und den Expansionsräumen.

Die Regeneratoren sind Wärmespeicher aus gasdurchlässigen Materialien mit hoher Wärmeleitfähigkeit und grosser Wärmekapazität, die je nach Strömungsrichtung des Arbeitsgases Wärme vom Gas aufnehmen oder an dieses abgeben. Die thermischen Verluste am Regenerator bestimmen die Endtemperatur und die Leistung der Maschine.

Die Effektivität  $\epsilon$  des Regenerators ist definiert:

$$\epsilon = \frac{Q}{Q_{\text{ideal}}}$$

$Q$  bezeichnet die vom Arbeitsgas an den Regenerator abgegebene Wärmemenge,  $Q_{\text{ideal}}$ , die Wärmemenge, die bei vollständiger Abkühlung des Arbeitsgases auf die Temperatur des Regenerators abgegeben werden würde. Die Effektivität muss nahe bei 1 liegen: Ein Wert von  $\epsilon = 0,99$  bedeutet schon einen Leistungsverlust von 20 %.<sup>5)</sup>

Der Philips-Stirling-Zyklus lässt sich in folgende Phasen zerlegen (Abb. 3a).

(1-2): Das Arbeitsgas wird isotherm bei Raumtemperatur komprimiert, und die entstehende Wärme über einen Wasserkühler abgeführt.

(2-3): Durch die Bewegung des Verdrängerkolbens in Pfeilrichtung wird das Gas durch den Regenerator gedrückt. Hierbei wird es bei konstantem Volumen auf die Temperatur des Regenerators abgekühlt. Die entzogene Energie wird im Regenerator gespeichert.

(3-4): Das Gas wird isotherm im Expansionsraum expandiert und nimmt Wärme aus der Umgebung auf (Kälteausstauscher).

(4-1): Der Verdrängerkolben drückt das Gas durch den Regenerator zurück in den Kompressionsraum. Die in der Phase (2-3) im Regenerator gespeicherte Energie wird vom Gas wieder aufgenommen.

Abb. 3b zeigt die Phasen dieses Kreisprozesses in der Temperatur-Entropie-Ebene (T-S-Diagramm).

### II.1.2 Wirkungsgrad

Unter der Voraussetzung, dass der Philips-Stirling-Zyklus reversibel ist, gelten für die an den Wasserkühler (Phase (1-2) ) abgegebene und für die vom Kälteausstauscher (Phase (3-4) ) aufgenommene Wärmemenge  $Q_-$  bzw.  $Q_+$  nach dem II. Hauptsatz

der Thermodynamik:

$$\begin{aligned} Q_+ &= m \cdot T_3 \cdot (s_4 - s_3) \\ Q_- &= m \cdot T_1 \cdot (s_2 - s_1) \end{aligned} \quad (1)$$

$m$  ist die Masse des Gases,  $T$  der Wert der Temperatur und  $s$  der Wert der Entropie in dem durch den Index gekennzeichneten Zustand im Diagramm.

Die gesamte Arbeit im Kreisprozess ist nach dem I. Hauptsatz der Thermodynamik:

$$A = Q_+ + Q_- \quad (2)$$

Sie ist negativ, da sie dem System zugeführt wird.

Als Wirkungsgrad  $\eta$  wird die Grösse

$$\eta = - \frac{Q_+}{A} \quad (3)$$

definiert. Für  $\eta$  ergibt sich mit den Werten aus der Gleichung(1):

$$\eta = \frac{T_3}{T_1 - T_3} \quad (4)$$

Je weiter die Temperaturen  $T_1$  und  $T_3$ , zwischen denen der Philips-Stirling-Zyklus arbeitet, auseinanderliegen, desto kleiner wird der Wirkungsgrad.

So erhält man für einen Zyklus zwischen Raumtemperatur und der Temperatur des flüssigen Stickstoffs ( $77,5^\circ\text{K}$ ) einen Wirkungsgrad  $\eta = 0.36$ , beträgt die Endtemperatur  $T_3$  jedoch  $20^\circ\text{K}$ , so ist  $\eta = 0.07$ .

In der zweistufigen Anordnung geht der zweite Stirling-Prozess verlustfrei von der Endtemperatur des ersten aus. Dadurch erhöht sich der Wirkungsgrad. Dieser beträgt z. B. zwischen den Temperaturen  $77.5^\circ\text{K}$  und  $20^\circ\text{K}$   $\eta = 0.12$ .

## II.2 Transfersystem

Das Transfersystem transportiert die Kälte vom Kälteaus-tauscher des Kryogenerators zum Target. Das Prinzip des Transfersystems ist das des Gasumlaufsystems. Am  $20^{\circ}$ -Kälteaus-tauscher des Kryogenerators wird Heliumgas unter 20 atm Druck gekühlt und durch Ventilatoren umgewälzt. Das kalte Gas steht am Target als Kühlgas zur Verfügung.

Das Transfersystem besteht aus zwei Kupferleitungen von 8 mm Durchmesser, die mit einigen Lagen sogenannter Superisoliationsfolie umwickelt sind. Die Kupferföhre sind von einem Stahlrohr umgeben, das zur Wärmeisolation auf  $10^{-6}$  torr evakuiert ist. Das Stahlrohr hat an der Targetseite einen 1 m langen Faltenbalg, der dazu dient, die Vibration des Kryogenerators abzufangen. Der Faltenbalg ermöglicht es ausserdem, das Target um 30 cm zu heben bzw. zu senken. Die Kupferleitungen haben zu diesem Zweck Dehnungsbögen.

Die Verluste in der Transferleitung liegen in der Grössenordnung 1 Watt/m.

## II.3 Kryostat und Streukammer

Der Kryostat (Abb. 4) wird von oben auf die Streukammer aufgesetzt. Die Streukammer hat ein Fenster mit einem Öffnungswinkel von  $230^{\circ}$  zum Teilchenaustritt. Dieses Fenster ist mit zwei H-Folien von je  $125\mu$  Dicke abgedichtet.

Der Wärmeaus-tauscher des Kryostaten besteht aus dem Vorkühler und dem Kondensator. Der Wärmeaus-tauscher arbeitet nach dem Gegenstromprinzip: Das kalte Heliumgas wird über die untere Zuführung in den Kondensator gedrückt, die Wasserstoffzufuhr erfolgt über die Leitung D von oben in den Vorkühler. Die Strömungsrichtungen beider Gase sind also entgegengesetzt. Wegen der benötigten guten Wärmeleitfähigkeit ist der Kondensator aus Kupfer gebaut.

Der kondensierte Wasserstoff läuft durch ein Röhrchen in die Zelle. Der Hohlraum im Inneren des Kondensators ist so bemessen, dass er den flüssigen Wasserstoff der Zelle aufnehmen kann.

Der Kryostat hat drei Ausgänge: die Entleerungsleitung A, das Zellenabgas B und das Kryostatenabgas C. Diese Leitungen und die Leitung D werden mit dem Füllstand verbunden.

Kondensator und Vorkühler sind mit einem Heizdraht umwickelt, der ein schnelles Aufwärmen des Kryostaten erlaubt. Gegen Wärmeverlust durch Strahlung ist der Kryostat mit Superisulationsfolie umwickelt. Eine Aluminiumfolie schützt die Superisulationsfolie vor lokaler Erhitzung durch die Gegenheizung.

Durch einen sogenannten "schwerleitenden Wärmeübergang" wird die Wärmezufuhr erheblich reduziert: der Abstand zwischen den kalten und den auf Raumtemperatur liegenden Teilen des Kryostaten wird hierbei mittels eines über den oberen Teil des Kryostaten gestülpten und verschweissten Rohres verlängert (Vgl. Abb.4). Wegen der benötigten schlechten Leitfähigkeit wurde als Material für den Hals des Kryostaten und den "schwerleitenden Wärmeübergang" V2A-Stahl verwendet. Die Wärmeleitfähigkeit von V2A-Stahl ist bei Raumtemperatur um den Faktor 30 kleiner als die von Kupfer. Bei tieferen Temperaturen nimmt die Wärmeleitfähigkeit von V2A-Stahl ab, während die von Kupfer ansteigt. (Vgl. Abb 5)

Ein unterhalb der Zelle angebrachter Kälteschild schützt die Zelle vor der Wärmestrahlung und reduziert dadurch die Blasenbildung in der Zelle.

#### II. 4 Füll- und Kontrollstand

Der Füllstand (Abb. 6) umfasst die zur Wasserstoffversorgung und Steuerung des Kryostaten notwendigen Ventile, die Kontrollinstrumente für den Zellendruck und den Kompressionsdruck des Kryogenerators, sowie Messgeräte für Vakuum und Vorvakuum. Ausserdem ist in den Füllstand die zur Evakuierung der Rohrleitungen und des Kryostaten notwendige Vorpumpe eingebaut. Die Abbildung zeigt die Aufgliederung der Frontplatte und die Anordnung der Instrumente:

- (1) Druckanzeige Puffervolumen
- (2) Zwei Manometer mit Fernanzeige für den Zellendruck  
und den Kompressionsdruck des Kryogenerators



- (3) Einschub mit Spannungsversorgung und Wattmeter für die Gegenheizung
- (4) Einschub mit Spannungsversorgung, Schalter und Kontrollampen für die elektromagnetischen Ventile
- (5) Einschub mit Vakuummessgeräten
- (6) Handventile
- (7) Vorpumpe

#### II.4.1 Anordnung und Schaltung der Ventile

Die Verwendung von elektromagnetischen Ventilen ermöglicht eine Fernbedienung des Füllstandes. Von den Ventilen sind einige im stromlosen Zustand geöffnet, andere stromlos geschlossen.

Aus Gründen der Sicherheit sind diese Ventile so angeordnet, dass bei einem möglichen Stromausfall die vier zum Kryostaten führenden Rohrleitungen untereinander verbunden bleiben und an das Abgas angeschlossen werden können, so dass ein Druckausgleich hergestellt werden kann. Ein Überdruckventil zur Sicherung der Zelle, das sich bei 1.5 atm öffnet, verbindet das Zellenabgas B mit der Abgasleitung.

Unabhängig von den elektromagnetischen Ventilen ist eine Bedienung des Füllstandes durch Handventile möglich.

Die Anordnung aller Ventile im Füllstand (Abb. 7) ist so, dass jede zum Kryostaten führende Leitung einzeln an die Pumpe oder an die Wasserstoffflasche angeschlossen werden kann, während mindestens an einer anderen Zuleitung Wasserstoff zugeführt bzw. gepumpt werden kann. Diese Aufteilung in voneinander unabhängige Operationen ist notwendig für den Fall, dass eine der Zuleitungen eifrieren sollte, und dass Eis durch Pumpen und Drücken aufgelöst werden muss. Eine ausführliche Darstellung der Funktionen des Füllstandes wird im Anhang gegeben.

#### II.4.2 Kontrolleinheiten

Zur Überwachung werden das Hochvakuum der Streukammer und das des Kühlkopfes sowie das Vorvakuum der Diffusionspumpen gemessen. Die Kontrolle des Zellen drucks und des Kompressionsdrucks der Kältemaschine erfolgt über je ein Manometer mit Fernanzeige. Die momentanen Werte können durch ein Digitalvoltmeter ausgelesen werden. In digitaler Form sind diese Messwerte der späteren Auswertung zugänglich. Ein weiteres Manometer zeigt den Druck im Puffervolumen an.

Die Spannungsversorgung der Gegenheizung geschieht über eine regelbare Triac-Schaltung. Die Regelung erfolgt digital.

#### III. TEMPERATURMESSUNGEN AM KRYOSTATEN

Zur Bestimmung des thermischen Verhaltens des Kryostaten wurden die Temperaturverteilung am Kryostaten und deren zeitliche Veränderung unter verschiedenen Bedingungen gemessen. Die gewonnenen Daten ermöglichten eine Bestimmung des Wärmeverlustes und der Wärmekapazität des Kryostaten.

Die Untersuchung erfolgte unter vier Aspekten:

- (1) die zeitliche Veränderung der Temperaturverteilung während des Abkühlens
- (2) die Temperaturverteilung im stationären Zustand
- (3) die zeitliche Veränderung der Temperaturverteilung nach Abschalten des Kryogenerators
- (4) die Veränderung der Temperaturverteilung bei zusätzlicher Wärmezufuhr durch Einschalten der Gegenheizung.

Temperaturverteilungen wurden sowohl für den evakuierten als auch für den mit Wasserstoff gefüllten Kryostaten gemessen, wobei im zweiten Fall unterschieden wurde zwischen einer mit Wasserstoffgas und einer mit flüssigem Wasserstoff gefüllten Zelle.

Zur Messung der Temperatur wurden Thermoelemente benutzt, da diese einfach zu handhaben sind und für die angestrebte Genauigkeit von 1 - 2 % ausreichen.

Die experimentelle Anordnung zur Messung der Thermospannungen ist in III.1, die Reproduktion der Eichkrurve der Thermoelemente in drei Temperaturbereichen in III.2 beschrieben. In III.3 werden die aufgenommenen Temperaturverteilungen und deren zeitliche Veränderung dargestellt und diskutiert.

### III. 1 Messverfahren

#### III.1.1 Wahl der Thermoelemente

Aus den möglichen Kombinationen von Metallen zu Thermoelementen wurde das Chromnickel-Konstantan-Element als das am besten geeignete ausgewählt. Diese Kombination liefert im Vergleich zu anderen Kombinationen die grössten Thermospannungen in dem Temperaturbereich von  $300^{\circ} - 15^{\circ}\text{K}$ .

Tabelle 3<sup>6)</sup>

Thermospannungen in [mV]			
T zwischen	Fe-Konst.	Cu-Konst.	Chromnickel-Konst.
$T_0 = 0^{\circ}\text{C}$ und			
$T_1 = -100^{\circ}\text{C}$	4.75	3.40	5.72
$T_2 = -200^{\circ}\text{C}$	8.55	5.78	8.70

Die Abhängigkeit der Spannung von der Temperatur wird durch die Eichkurve<sup>7)</sup> in Abb. 8 wiedergegeben. Bei dieser Untersuchung wurde die Eichkurve in drei Temperaturbereichen nachgemessen: in der Nähe von  $20^{\circ}\text{K}$ , bei etwa  $80^{\circ}\text{K}$  und zwischen  $0 - 100^{\circ}\text{C}$ . Bei diesen Messungen war der Siedepunkt des flüssigen Stickstoffs bei 1 atm Druck ( $77.4^{\circ}\text{K}$ ) der Nullpunkt der Spannungsmessung.

#### III.1.2 Anordnung der Thermoelemente

Die Thermoelemente wurden so auf der Oberfläche des Kryostaten angeordnet, dass eine möglichst vollständige Temperaturverteilung bestimmt

werden konnte. Es wurde zwischen je zwei Messpunkten die relative Spannung gemessen. Für eine absolute Temperaturmessung wurde von dem Thermoelement am unteren Rand des Kondensators die Spannung gegen siedenden Stickstoff gemessen.

Abb. 4 zeigt die Punkte, an denen die Thermoelemente angebracht wurden (die in der folgenden Aufzählung eingeklammerten Werte geben in cm die Entfernung des Messpunktes vom unteren Rand des Kondensators an):

- (1) am unteren Rand des Kondensators (0.0)
- (2) in der Mitte des Kondensators (5.5)
- (3) am oberen Rand des Kondensators (10.5)
- (4) in der Mitte des Vorkühlers (19.5)
- (5) am oberen Rand des Vorkühlers (29.5)
- (6) am Hals des Kryostaten (36.5)
- (7) an der Wasserstoffzuleitung
- (8) an der zum Wärmeaustauscher führenden Transferleitung
- (9) an der vom Wärmeaustauscher wegführenden Transferleitung

Die Thermoelemente wurden auf die Oberfläche gelötet, die freien Enden der Thermodrähte über Vakuumdurchführungen nach außen geleitet. Die dadurch entstehenden zusätzlichen Lötstellen wurden mit einer Kappe aus Schaumstoff gegen äußere Temperatureinflüsse isoliert. Diese Isolierung hielt die Lötstellen auf gleicher Temperatur und verhinderte so zusätzliche Thermospannungen.

### III.1.3 Auslese der Spannungswerte

Zum Auslesen der Thermospannungen wurde ein hochohmiges Digitalvoltmeter im  $\mu\text{V}$ -Bereich mit einem systematischen Ablesefehler von 0.2 % benutzt. Die Thermodrähte wurden über einen Umschalter mit dem Digitalvoltmeter verbunden. Die Spannungen zwischen den Messpunkten wurden im Mittel alle 5 min gemessen.

### III.2 Fehlerabschätzung für die Temperaturmessung

Zur Ermittlung des systematischen Fehlers, der durch die zusätzlichen Thermospannungen an den Lötstellen der Vakuumdurchführungen bedingt ist,

wurden die gemessenen Thermospannungen in drei Temperaturbereichen mit den Werten der Eichkurve (Abb. 8) verglichen.

Die Spannungen wurden gemessen zwischen unter Atmosphärendruck siedendem Stickstoff als Bezugspunkt und

- (1) flüssigem Wasserstoff
- (2) flüssigem Stickstoff
- (3) Wasser in einem Temperaturbereich von  $0^{\circ} - 92^{\circ}\text{C}$ .

In den ersten beiden Fällen wurde die Temperatur aus einer Dampfdruckmessung mit einer Genauigkeit von 0.5 % ermittelt.

Der hier gemessene Zusammenhang von Spannung und Temperatur wich nicht mehr als 1 % von dem in der Eichkurve gegebenen ab. Abb. 9 zeigt als Beispiel die Ergebnisse der in flüssigem Wasserstoff durchgeführten Vergleichsmessung und die Abweichung der Messwerte von der Eichkurve. Der für die Punkte der Eichkurve eingetragene Fehler von 1 % ist dadurch bedingt, dass die Werte von einer graphischen Darstellung abgelesen wurden. Wegen der Geringfügigkeit der systematischen Abweichung der Werte der Vergleichsmessung von denen der Eichkurve konnte diese für die Umwandlung der gemessenen Spannungswerte in Temperaturwerte zugrunde gelegt werden.

Zu dieser systematischen Abweichung von 1 % kamen noch folgende Fehler hinzu:

- (1) der Ablesefehler der Werte der Eichkurve, der bei  $20^{\circ}\text{K}$  1 % betrug, und der sich bis auf etwa 0.1 % bei  $300^{\circ}\text{K}$  verringerte.
- (2) die Reproduzierbarkeit der Messwerte in der Grössenordnung von 1 %
- (3) der Ablesefehler des Digitalvoltmeters von 0.2 %.

Hieraus ergab sich für jede Temperaturmessung ein Fehler in der Grössenordnung von 2 %. Das bedeutete für die direkte Temperaturmessung am Kondensator einen Fehler von 2 %, für die Temperaturwerte der anderen Messpunkte, die nach Addition von relativen Spannungswerten bestimmt werden, einen Fehler in der Grössenordnung von 2.5 - 3 %.

### III.3 Zeitlicher Verlauf der Temperatur

#### III. 3.1 Abkühlvorgang

Die Zeit zum Abkühlen des Kondensators bis auf Wasserstofftemperatur

betrug 60 - 70 min. Nach dieser Zeit war jedoch noch nicht der stationäre Zustand erreicht, in dem die Temperatur u die Bedingung  $du/dt = 0$  erfüllen muss. Da die Leistungsabgabe des Kryogenerators Schwankungen unterworfen war, konnte der stationäre Zustand nicht exakt hergestellt werden. Die gemessenen Temperaturwerte streuten demzufolge um einen mittleren Wert.

Der stationäre Zustand wurde wie folgt definiert:

- (1) Die Temperaturwerte am Kondensator sollen innerhalb der Fehlergrenzen von  $\pm 0,2 \%$  konstant bleiben
- (2) Die Temperaturänderung am Hals des Kryostaten soll nicht mehr als  $\pm 0,2^{\circ}$  innerhalb von 10 min betragen.

Die zweite Bedingung war notwendig, weil sich eine stationäre Temperaturverteilung am Kondensator schon nach 80 min einstellte, während die Temperatur im oberen Teil des Kryostaten noch weiter absank (Abb. 10). Hier war die Temperaturverteilung erst nach 200 - 220 min stationär.

Für die Temperaturverteilung im stationären Zustand erwiesen sich die folgenden Werte als typisch:

Kondensator	$19^{\circ}\text{K}$
Vorkühler (Mitte)	$22^{\circ}\text{K}$
Vorkühler (oben)	$52^{\circ}\text{K}$
Hals des Dryostaten	$133^{\circ}\text{K}$

Diese Werte schwankten bei den verschiedenen Messungen um  $\pm 2^{\circ}$ .

Aus den gemessenen Kurven, die die zeitliche Veränderung der Temperaturverteilung während des Abkühlens wiedergeben, ist als Beispiel die in Abb. 11 dargestellte ausgewählt. An ihr lässt sich die Wirkung des einkondensierenden Wasserstoffs und die der Gegenheizung am besten zeigen. Der Übersichtlichkeit wegen ist jedoch nur der Temperaturverlauf von Kondensator (1), oberem Rand des Vorkühlers (2) und Hals des Kryostaten (3) eingetragen.

Diskussion der Temperaturverteilung:

Vor Einschalten des Kryogenerators hatte der Kryostat eine Temperatur von etwa  $290^{\circ}\text{K}$ . Das System wurde mit Wasserstoffgas gefüllt und abgekühlt.

Einige Vorgänge bei diesem Versuch und deren Einfluss auf die Temperaturverteilung werden im folgenden näher betrachtet:

Bis 60 min:

Ein steiler, gleichmässiger Temperaturabfall zeigt die gute Wärmeableitung an das Kühlgas.

Nach 63 min:

Der erste flüssige Wasserstoff wird in der Zelle beobachtet. Nach weiteren 7 min ist die Zelle gefüllt. Die Temperatur des Kondensators (1) sinkt weiter: der Kondensator leitet die freiwerdende Kondensationswärme gut an das Kühlgas ab. Das aus dem Puffervolumen nachströmende Wasserstoffgas erwärmt die oberen Teile des Kryostaten ( (2) und (3) ).

Nach 94 min:

Die Gegenheizung wird mit einer Leistung von 16 Watt für die Dauer von 20 min eingeschaltet. Die Kühlleistung am Target erweist sich als ausreichend: der Kondensator erwärmt sich geringfügig um  $1^{\circ}$ , an den anderen Meßstellen tritt eine leichte Erwärmung für die Dauer von 4 - 5 min auf. Dann hat sich der Kryogenerator auf den neuen Arbeitspunkt eingestellt.

Nach 200 min:

Es ist eine stationäre Temperaturverteilung erreicht. Die Temperaturdifferenz am Kondensator ist wegen der guten Leitfähigkeit von Kupfer  $0.5^{\circ}$ . die Temperaturdifferenz zwischen dem Kondensator und dem oberen Rand des Vorkühlers etwa  $30^{\circ}$ . Ein sehr steiler Temperaturanstieg von etwa  $80^{\circ}$  ist zwischen dem Vorkühler und dem obersten Meßpunkt am Hals des Kryostaten festzustellen. An der Aussenseite oberhalb des schwerleitenden Wärmeübergangs liegt die Temperatur einige Grad unter Raumtemperatur.

### III.3.2 Aufwärmvorgang

Zur Untersuchung der Wärmeaufnahme des Kryostaten wurde nach Erreichen des stationären Zustands der Kryogenerator abgeschaltet und die zeitliche Veränderung der Temperaturverteilung beobachtet. Dabei wurden drei verschiedene Messungen vorgenommen, deren Ergebnisse in den Kurven I - III der Abb. 12 - 14 dargestellt und im folgenden erläutert werden. Es wurden die gleichen drei Meßpunkte wie unter 4.1 ausgewählt.

#### Kurve I:

Diese drei Kurven zeigen den zeitlichen Temperaturverlauf für einen evakuierten Kryostaten. Die Werte dienen als Grundlage für die späteren Rechnungen, weil sie das ungestörte System beschreiben.

#### Kurve II:

Die Anfangsbedingungen sind eine stationäre Temperaturverteilung bei einer mit flüssigem Wasserstoff gefüllten Zelle. Nach dem Ausschalten des Kryogenerators ändert sich die Temperatur in den ersten 10 min am Kondensator (1) nur wenig. Während dieser Zeit verdampft der flüssige Wasserstoff in der Zelle. Danach nimmt die Kurve (1) denselben Verlauf wie unter I. Der starke Temperaturabfall im oberen Teil des Kryostaten (3) wird durch die Konvektion des sich im Inneren des Kryostaten befindenden kalten Wasserstoffgases verursacht. Der im Verhältnis zu den entsprechenden Kurven unter I stärkere Temperaturanstieg am Vorkühler (2) und am Hals (3) ist ebenfalls durch Konvektion bedingt.

#### Kurve III:

Dem evakuierten Kryostaten wurde in den Zeiträumen von der 11. - 30. und von der 70. - 110. min zusätzlich Energie durch Einschalten der Gegenheizung zugeführt. Die Leistung betrug dabei 16 bzw. 36 Watt. Aus einem Vergleich dieser Werte mit denen von I lässt sich die mittlere Wärmekapazität des Kryostaten bestimmen.



#### IV. AUSWERTUNG DER TEMPERATURMESSUNGEN

Aus den gemessenen Temperaturverteilungen und deren zeitlicher Veränderung können Wärmeabgabe und -aufnahme des Kryostaten berechnet werden.

(1) Die dem Target während eines Experiments dauernd zugeführte Wärmemenge wird aus der Temperaturverteilung im stationären Zustand berechnet. (IV.1)

(2) Aus der zeitlichen Veränderung der Temperaturverteilung während des Abkühl- und des Aufwärmvorganges wird die gesamte dem Kryostatent entzogene Wärmemenge bzw. die gesamte unter verschiedenen Bedingungen zugeführte Wärmemenge berechnet. (IV.2).

(3) Es ist die Temperaturabhängigkeit der Wärmeaufnahme zu untersuchen (IV.3).

es zeigt sich, daß die Grösse der vom Kryostaten aufgenommenen Wärmemenge bestimmt wird durch die Wärmestrahlung. Dieses Ergebnis wird in Kapitel V. durch die Auswertung der Differentialgleichung der Wärmeleitung bestätigt.

##### IV.1 Der stationäre Zustand

Die Wärmeaufnahme des Kryostaten durch Wärmestrahlung und Wärmeleitung im stationären Zustand wird aus dem Wärmestrom berechnet, der zwischen zwei Punkten mit verschiedenen Temperaturen fließt.<sup>9)</sup>

##### IV.1.1 Berechnung der Wärmemenge im stationären Zustand

Der Betrag der gesamten Wärmemenge  $Q$ , die bei einem Temperaturgradienten  $u$  pro Zeiteinheit durch die Fläche  $F$  in Richtung der Normalen  $\vec{n}$  fließt, ist gleich dem Integral über die Wärmestromdichte:

$$|Q| = \int_F \lambda(x, u) \cdot \text{grad } u \cdot dF \quad (9)$$

$\lambda(\vec{x}, u)$  ist die Wärmeleitfähigkeit des Stoffes. Da der Kryostat aus den

beiden Materialien V2A-Stahl und Kupfer besteht, die eine unterschiedliche Wärmeleitfähigkeit haben, muss an der Grenzfläche von Stahl und Kupfer die Bedingung:

$$u_{Cu} = u_{V2A}, \quad (\lambda \text{grad } u)_{Cu} = (\lambda \text{grad } u)_{V2A} \quad (10)$$

berücksichtigt werden.

Bei der Berechnung der Wärmemenge wird die Dicke der Wand des Kryostaten vernachlässigt gegenüber der Länge und die Temperaturverteilung zylindersymmetrisch angenommen. Das Problem ist also eindimensional. Es wird nur die in Richtung der Achse des Kryostaten fließende Wärmemenge berücksichtigt.

#### IV.1.2 Charakterisierung des numerischen Verfahrens zur Berechnung der Wärmemenge

---

Zur numerischen Integration wird Gleichung (9) in folgender Form umgeschrieben:

$$Q = \sum_i \lambda_j(x, u) \cdot \Delta T_j \cdot \frac{F}{d} \quad (11)$$

$d$  ist der Abstand zweier Querschnitte  $F$  und wird gleich 0.5 cm gewählt. Die Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit von der Temperatur wird in dem Beitrag  $\lambda_j \Delta T_j$  berücksichtigt. Für jedes der Intervalle  $d$  wird die Temperaturdifferenz  $\Delta T_j$  zwischen dem Anfangs- und Endpunkt aus der Temperaturverteilung berechnet. Die Werte der  $\lambda_j$  werden durch Interpolation mit Hilfe der Spline-Funktion aus den experimentell bekannten Funktionen  $\lambda = \lambda(u)$  von Kupfer und Stahl<sup>10)</sup> gewonnen (Abb. 9 und 10).

Der Wärmestrom wird für drei Abschnitte getrennt berechnet: für den Kondensator, den Vorkühler und den Hals. Eine Abschätzung ergibt, dass der Wärmestrom durch die Wasserstoffzuführung  $D$  kleiner als 0.03 Watt ist und daher vernachlässigt werden kann.

#### IV.1.3 Der Fehler des numerischen Verfahrens

Als Temperaturwert zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit  $\lambda_j$  wird der-

jenige am Anfang des Intervalls gewählt. Dieses ist erlaubt, weil sich  $\lambda_1$  über die Intervalllänge nur um weniger als 0,5 % ändert.

Der geringe Interpolationsfehler für den steilen Anstieg der Temperatur im oberen Teil des Kryostaten ist darin begründet, daß sich die Wärmeleitfähigkeit von Stahl als Funktion der Temperatur nur wenig ändert. Für die Berechnung am Kondensator macht sich wegen der geringen Temperaturdifferenz über dem Kondensator die grosse Änderung der Wärmeleitfähigkeit im Temperaturbereich von  $15^{\circ} - 30^{\circ}\text{K}$  nicht bemerkbar.

Der relative Fehler bei der Berechnung der Wärmemengen wird also im wesentlichen durch den der Temperaturmessung bestimmt. Für die Wärmeaufnahme ist er am Kondensator in der Grössenordnung 2 %, am Vorkühler 2,5 % und am Hals 3 %. Die Vergrösserung des relativen Fehlers erklärt sich aus der Art des in III.2 beschriebenen Messverfahrens.

Da die Grösse der Funktion  $\lambda = \lambda(u)$  für verschiedene Kupfersorten in dem Temperaturbereich von  $15^{\circ} - 30^{\circ}\text{K}$  etwa um einen Faktor 1,5 schwankt (Tabelle 4)<sup>10)</sup>, hat die Wahl der Wärmeleitfähigkeit auf die Ergebnisse der nach Gleichung (11) berechneten Wärmemenge einen entscheidenden Einfluss. Dieser Einfluss verringert sich bei höheren Temperaturen.

Tabelle 4 Wärmeleitfähigkeit in  $[\text{Watt} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{grad}^{-1}]$  bei

Kupfer	$20^{\circ}$	$100^{\circ}$	$200^{\circ}$	$300^{\circ}\text{K}$
mit Tellur verunreinigt	6.4	4.2	3.8	3.8
reinstes E-Kupfer	90.0	4.8	4.0	3.9
E-Kupfer	11.0	4.5	4.0	3.9

Obwohl nicht bekannt war, wie sich die für den Bau des Kondensators verwendete Kupferart (E-Kupfer) während der Verarbeitung verändert hat, wurden für die Berechnung der Wärmeleitfähigkeit die Werte für normales E-Kupfer benutzt.

#### IV.1.4 Ergebnisse und Folgerungen

Aus der numerischen Integration von Gleichung (11) ergeben sich die

folgenden Werte für die im stationären Zustand in Richtung der Kryostatenachse fließenden Wärmemengen:

(1) Kryostat, evakuiert und ohne Zelle:

Kondensator	$7.49 \pm 0.15$	Watt
Vorkühler	$0.13 \pm 0.003$	Watt
Hals	$0.96 \pm 0.03$	Watt

(2) Kryostat und Zelle sind mit Wasserstoffgas der Temperatur  $20^{\circ}\text{K}$  gefüllt:

Kondensator	$17.30 \pm 0.4$	Watt
Vorkühler	$0.13 \pm 0.003$	Watt
Hals	$0.97 \pm 0.03$	Watt

(3) Die Zelle ist mit flüssigem Wasserstoff gefüllt:

Kondensator	$17.60 \pm 0.4$	Watt
Vorkühler	$0.13 \pm 0.003$	Watt
Hals	$0.99 \pm 0.03$	Watt

Der Unterschied der Wärmeaufnahme zwischen (1) und (2) bzw. (3) wird in IV.4 näher diskutiert.

Während dieser Messungen arbeitete die Kältemaschine nicht immer zuverlässig. Die erreichte Endtemperatur und die am Target zur Verfügung stehende Leistung war demnach sehr unterschiedlich. Dieser Mangel konnte inzwischen durch den Einbau neuer Regeneratoren und eines neuen Kühlkopfes behoben werden.

Im folgenden wird einmal der mittlere Emissionskoeffizient  $\bar{\epsilon}$  für die nur unzureichend isolierten Flächen des Kondensators senkrecht zur Kryostatenachse berechnet, zum anderen eine Abschätzung der vom Außenmantel des Kryostaten aufgenommenen Wärme gegeben.

(1) Mit den oben genannten Einschränkungen ergibt sich aus dem Wert  $Q = 7.49$  Watt der vom Kondensator in der Zeiteinheit aufgenommenen Wärmemenge nach dem Stefan-Boltzmann-Gesetz:

$$Q = \bar{\epsilon} \cdot \sigma \cdot F \cdot (T_1^4 - T_2^4) \quad (12)$$

der mittlere Emissionskoeffizient  $\bar{\epsilon}$  von Kondensator und Kälteschild. Mit  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-12}$  Watt  $\cdot$  cm<sup>-2</sup>  $\cdot$  grd<sup>-4</sup>,  $T_1 = 290^\circ$ ,  $T_2 = 20^\circ$ K und  $F = 390$  cm<sup>2</sup> ergibt sich  $\bar{\epsilon} = 0,5$ .

Die Wärmeaufnahme pro Flächen- und Zeiteinheit eines durch n Schichten Superisolationsfolie mit dem Emissionskoeffizienten  $\epsilon$  isolierten Körpers beträgt:<sup>11)</sup>

$$q = \frac{\sigma \cdot \epsilon \cdot (T_1^4 - T_2^4)}{(n+1) (2 - \epsilon)} \quad (13)$$

Für  $T_1$  wird Raumtemperatur eingesetzt, für  $T_2$  ein mittlerer Wert von  $20^\circ$ K für den Kondensator und den Vorkühler, von  $80^\circ$ K für den Hals des Kryostaten. Die nach Gleichung (13) abgeschätzte Wärmemenge beträgt 2,5 Watt. Es wird sich zeigen, dass dieser Wert zu niedrig ist (vergl. Kap. V.).

Die Temperaturverteilung entlang dem Kryostaten ist im stationären Zustand nicht linear (Abb. 10). Dieses ist eine Folge der fortlaufenden Kühlung durch den Kryogenerator. Daher kann auch der Wärmestrom durch den Querschnitt keine Konstante sein.

Die Abb. 15 zeigt den Wärmestrom in Watt aufgetragen gegen die Kryostatenlänge. Der Kurvenverlauf zeigt:

(1) Die gesamte dem Kondensator zugeführte Wärmemenge wird noch im Kondensator an das Kühlgas abgeführt.

(2) Die durch Wärmeleitung dem oberen Teil des Kryostaten zugeführte Wärmemenge wird im oberen Bereich des Vorkühlers weggekühlt.

Diese beiden Ergebnisse zeigen die hinreichende Auslegung des Kühlsystems.

## IV.2 Wärmeabgabe und Wärmeaufnahme des Kryostaten im nichtstationären Zustand

Aus der zeitlichen Veränderung der Temperaturverteilung wird die zeitliche Änderung der abgegebenen bzw. der aufgenommenen Wärmemenge des Kryostaten mit Hilfe der Enthalpie berechnet, ebenfalls die gesamte abgegebene bzw. aufgenommene Wärmemenge. Aus dem Vergleich der Wärmeaufnahmen mit und ohne zusätzliche Wärmezufuhr durch die Gegenheizung ergibt sich die Wärmekapazität des Kryostaten.

### IV. 2.1 Das numerische Verfahren

Die Enthalpie  $W$  ist durch das vollständige Differential definiert:

$$dW = T \cdot dS + V \cdot dP \quad (14)$$

Dabei ist  $T$  die Temperatur,  $S$  die Entropie,  $V$  das Volumen und  $P$  der Druck. Bei konstantem Druck folgt:

$$dW = T \cdot dS = dQ \quad (15)$$

Für Festkörper ist also das Differential  $dW$  gleich dem Differential  $dQ$  der aufgenommenen bzw. abgegebenen Wärmemenge.

Wird ein Körper der Masse  $m$  von der Temperatur  $T_1$  auf die Temperatur  $T_2$  abgekühlt oder erwärmt, so ist die abgegebene bzw. aufgenommene Wärmemenge  $Q$  dem Betrage nach gleich:

$$|Q| = m \cdot (W_1 - W_2) \quad (16)$$

Dabei sind  $W_i$  die Werte der Enthalpie bei den Temperaturen  $T_i$ . Für Kupfer und Stahl ist die Enthalpie als Funktion der Temperatur bekannt und tabelliert<sup>10)</sup>.

Für die Berechnung der Wärmeaufnahme bzw. der Wärmeabgabe wird der Kryostat in Richtung der Achse in zylindrische Volumenelemente von 0.5 cm Höhe aufgeteilt. Zur Berechnung der Massen  $\Delta m$  der Volumenelemente wird die Dichte als konstant angenommen, da sich das Volumen der Kryostaten bei einer Abkühlung von  $300^{\circ}\text{K}$  auf  $20^{\circ}\text{K}$  nur um 1 % ändert. Die Wärmemenge wird dann nach folgendem Verfahren berechnet:

(1) Nach der für den Anfang und das Ende des Aufwärm- bzw. des Abkühlvorganges gemessenen Temperaturverteilung werden für jedes Massenelement  $\Delta m$  die durch die Temperatur bestimmten Enthalpiewerte aufgesucht und  $\Delta Q$  nach der Gleichung (16) berechnet. Über die  $\Delta Q$  wird summiert. Hieraus folgt die gesamte während der Beobachtungszeit abgegebene bzw. aufgenommene Wärmemenge.

(2) Aus der Änderung der im Mittel alle 5 min gemessenen Temperaturverteilung wird ebenfalls nach Gleichung (16) die Änderung der Wärmemenge pro Zeitintervall bestimmt. Hieraus kann die pro Zeitintervall zugeführte Wärmemenge ermittelt werden.

#### IV.2.2 Wärmeabgabe

Die gesamte nach Gleichung (16) berechnete dem Kryostaten entzogene Wärmemenge beträgt bis zum Erreichen des stationären Zustands  $(6.1 \pm 0.2) \cdot 10^5$  Joule. Um die vorhandene Menge Wasserstoff (45.8 l bei einem Fülldruck von 1.4 atm) einzukondensieren, ist dieser eine Energie von  $1.57 \cdot 10^4$  Joule zu entziehen. Dieses sind aber nur 2.6 % der dem Kryostaten entzogenen Wärmemenge. Außerdem erstreckt sich die Kühlung des Wasserstoffs über einen Zeitraum von etwa 70 min. So zeigt dann ein Vergleich der Werte, die für einen evakuierten und einen mit Wasserstoff gefüllten Kryostaten berechnet worden sind, daß die bei der Abkühlung des Wasserstoffs entzogene Wärmemenge und die Kondensationswärme nicht nachzuweisen sind.

Der Kondensator hat etwa 70 min nach Beginn des Abkühlens eine Temperatur von  $20^{\circ}\text{K}$  erreicht (vergl. Abb. 10). Die Temperaturverteilung am Kondensator ist zu dieser Zeit schon stationär, die Temperaturverteilung am Kryostaten jedoch noch nicht. Dem Kryostaten sind aber bis zum Erreichen der stationären Temperaturverteilung am Kondensator bereits 99 % der gesamten Wärmemenge entzogen. Die Grösse der vom Kryostaten abgegebenen Wärmemenge wird also bestimmt von der Wärmekapazität des Kondensators.

### IV.2.3 Wärmeaufnahme

Bei der nach Gleichung (16) berechneten Wärmeaufnahme (Abb. 17) sind die drei durch die Kurven I - III dargestellten Fälle zu unterscheiden:

- Kurve I: Diese Kurve zeigt die Zeitabhängigkeit der Wärmeaufnahme für den evakuierten Kryostaten.
- Kurve II: Dem evakuierten Kryostaten ist in den Zeitintervallen von der 11. - 30. und der 70. - 110. min zusätzlich Wärme durch Einschalten der Gegenheizung mit einer Leistung von 16 bzw. 36 Watt zugeführt worden.

Aus dem Abstand der Kurven I und II ergibt sich die gesamte durch die Gegenheizung zugeführte Energie. Diese ist zur Zeit  $t = 150 \text{ min}$   $10,55 \cdot 10^4 \text{ Joule}$ . Ein Vergleich mit der aus der gemessenen Stromstärke und Spannung ermittelten Leistung von  $10,95 \cdot 10^4 \text{ Joule}$  zeigt eine Übereinstimmung der Werte innerhalb von 4 %.

Aus der durch die Gegenheizung zugeführten Wärmemenge lässt sich die mittlere Wärmekapazität  $\bar{C} = \bar{c}_p m$  des Kryostaten berechnen.  $\bar{c}_p$  ist die mittlere spezifische Wärme und  $m$  die Masse des Kryostaten.

Die zugeführte Wärmemenge  $Q$ , die den Kryostaten von der Temperatur  $T_1$  auf die Temperatur  $T_2$  erwärmt, muß der Gleichung :

$$Q = \bar{c}_p m \cdot (T_2 - T_1) \quad (17)$$

genügen. Für  $T_1$  und  $T_2$  müssen die Temperaturwerte des Kondensators vor und nach dem Erwärmen eingesetzt werden, da die Wärmekapazität des Kryostaten durch den Kondensator bestimmt ist.

Es ergibt sich mit  $T_1 = 37^\circ\text{K}$  und  $T_2 = 147^\circ\text{K}$  für  $C$  der Wert:  $\bar{C} = 9,6 \cdot 10^2 \text{ Joule} \cdot \text{grad}^{-1}$ . Dieses ist etwa die Hälfte der Wärmekapazität bei Raumtemperatur. Für  $\bar{c}_p$  folgt mit  $m = 6,2 \cdot 10^3 \text{ g}$  der Wert:  $\bar{c}_p = 0,155 \text{ Joule} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{grad}^{-1}$ . Dieser Wert von  $\bar{c}_p$  gehört zu einer Temperatur von etwa  $70^\circ\text{K}$ .<sup>10)</sup>



Kurve III: Diese Kurve zeigt die Wärmezunahme des mit Wasserstoffgas gefüllten Kryostaten. Die Anfangsbedingung im stationären Zustand ist eine mit flüssigem Wasserstoff gefüllte Zelle. In den ersten 10 min verdampft der flüssige Wasserstoff und entzieht dem Kryostaten die Kondensationswärme. Die Temperatur des Kondensators bleibt während dieser Zeit fast konstant (vergl. Abb. 11). Dadurch verzögert sich die Erwärmung des Kryostaten.

Durch Verschieben der Kurve III in Richtung der negativen Zeitachse kann sie mit Kurve I vollständig zur Deckung gebracht werden. Dieser Vergleich zeigt, daß dem Kryostaten durch Konvektion von Wasserstoffgas keine messbare Wärmemenge zugeführt wird.

Da die Konvektion keinen messbaren Beitrag zur Erwärmung liefert, muß der Abstand der beiden Kurven I und III für große Zeitwerte gleich der Kondensationswärme sein. Zur Zeit  $t = 150$  min beträgt der Abstand beider Kurven  $1.62 \cdot 10^4$  Joule. Die Kondensationswärme der gesamten Wasserstoffmenge beträgt  $1.57 \cdot 10^4$  Joule. Beide Werte stimmen innerhalb von 3,5 % überein.

#### IV.3 Temperaturabhängigkeit der Wärmeaufnahme

Die Wärmeaufnahme des Kryostaten geschieht durch Wärmeleitung und Wärmestrahlung. Der Beitrag der Wärmestrahlung überwiegt. Da das Verhalten des Kryostaten beim Erwärmen durch die Wärmekapazität des Kondensators bestimmt ist, muß die Wärmeaufnahme als Funktion der Kondensatortemperatur untersucht werden. Es wird angenommen, daß die Temperaturabhängigkeit der Wärmeaufnahme durch ein Polynom in  $T$  und  $T^4$  beschrieben werden kann.

Wird aus der aufgenommenen Wärmemenge  $E$  und der Kondensatortemperatur  $T_{\text{Kond}}$  die Größe  $E/(T_u^4 - T_{\text{Kond}}^4)$  gebildet mit  $T_u$  Umgebungstemperatur, so ist diese Größe für Temperaturen zwischen  $20^\circ\text{K}$  und  $70^\circ\text{K}$  innerhalb von 3,5 % konstant. Für Temperaturen über  $70^\circ\text{K}$  wird die Abweichung grösser. Es nimmt in diesem Temperaturbereich offensichtlich der relative Anteil der durch Wärmeleitung zugeführten Wärme zu.

Eine genauere Bestimmung der Temperaturabhängigkeit wird dadurch möglich, daß ein Polynom  $a + b T + c T^4$  mit beliebigen Koeffizienten  $a$ ,  $b$  und  $c$  an die Meßwerte  $E$  nach der Methode der kleinsten Fehlerquadrate angepasst wird. Die Güte der Anpassung wird durch einen  $\chi^2$ -Test bestimmt.

Zur Beschreibung des Temperaturbereichs zwischen  $20^\circ\text{K}$  und  $150^\circ\text{K}$  werden sowohl die Koeffizienten  $b$  als auch  $c$  benötigt. Das  $\chi^2$  pro Freiheitsgrad ist allerdings groß, es beträgt 8,6.

Die Erwärmung des Kryostaten läßt sich also durch ein Polynom in  $T$  und  $T^4$  beschreiben. Der schlechte Angleich erklärt sich daraus, daß die zugrunde liegenden vereinfachenden Annahmen:

(1) Die Wärme wird durch Wärmeleitung über den schwerleitenden Wärmeübergang in Richtung der Kryostatenachse zugeführt,

(2) Die Wärmestrahlung erwärmt nur den Kondensator

nicht erfüllt sind. Bei der Betrachtung der Differentialgleichung der Wärmeleitung in Kapitel V. wird sich zeigen, daß ein nicht zu vernachlässigender Beitrag zur Erwärmung vom Zylindermantel des Kryostaten durch die Wärmestrahlung aufgenommen wird.

Diese vom Zylindermantel aufgenommene Wärmemenge kann dann besser zum Kondensator geleitet werden, wenn sich die Wärmeleitfähigkeit des Kryostaten während des Aufwärmens erhöht. Nach etwa 60 min hat sich die Leitfähigkeit der V2A-Teile des Kryostaten um einen Faktor 2 erhöht. Der erhöhte Beitrag durch Wärmeleitung zeigt sich in der stärker werdenden Abweichung von der Proportionalität zu  $T^4$ .

#### IV.4 Bestimmung der Dichte des flüssigen Wasserstoffs in der Zelle

Aus der mit Wasserstoff gefüllten Zelle verdampft pro Zeiteinheit eine bestimmte Menge Wasserstoff in das Zellenabgas (Leitung B in Abb. 4). Das Gas erwärmt sich in den Leitungen des Füllstandes bis auf Raumtemperatur und wird über die Wasserstoffzufuhr (Leitung D in Abb. 4)

wieder dem Kondensator zugeführt. Da sich das System im stationären Zustand befindet, sind die verdampfende und die einkondensierte Menge Wasserstoff gleich.

Aus der erhöhten Kühlleistung gegenüber dem evakuierten Kryostaten kann die Menge des Wasserstoffs berechnet werden, die aus der Zelle verdampft, und daraus die durch Blasenbildung verursachte Änderung der Dichte des flüssigen Wasserstoffs abgeschätzt werden.

#### IV.4.1 Berechnung der in der Zeiteinheit verdampfenden Menge Wasserstoff

Die vom Kondensator im stationären Zustand aufgenommene Wärmemenge ist:

- (1) für einen evakuierten Kryostaten:  $Q_1 = 7.49$  Watt,  
 (2) bei einer mit flüssigem Wasserstoff gefüllten Zelle:  $Q_2 = 17.60$  Watt.

Aus der Differenz  $\Delta Q = Q_2 - Q_1 = 10.11$  Watt folgt aus der nach  $m$  aufgelösten Gleichung:

$$Q = m \cdot c_p \cdot (T_2 - T_1) + m \cdot c_k \quad (18)$$

die Menge des verdampfenden Wasserstoffs in  $[g \text{ sec}^{-1}]$ .  $c_p$  ist die spezifische Wärme des Wasserstoffs bei konstantem Druck,  $c_k$  die Kondensationswärme,  $T_2 = 300^\circ\text{K}$  und  $T_1 = 20^\circ\text{K}$ .

Mit den Werten  $c_p \cdot (T_2 - T_1) = 3.58 \cdot 10^3 \text{ Joule} \cdot \text{g}^{-1}$  und  $c_k = 4.54 \cdot 10^2 \text{ Joule} \cdot \text{g}^{-1}$  folgt für die pro Zeiteinheit verflüssigte Menge Wasserstoff:  $m = 2.51 \cdot 10^{-3} \text{ g}$ . Dieser Wert ist gleich der verdampfenden Menge, da sich der Kryostat im stationären Zustand befindet.

#### IV. 4.2 Berechnung des Emissionskoeffizienten der Zelle

Aus dem Vergleich der von der Zelle tatsächlich aufgenommenen Wärmemenge mit der von der Zelle als schwarzen Körper aufgenommenen Wärmemenge folgt der Emissionskoeffizient der Zelle.

(1) Um  $2.51 \cdot 10^{-3} \text{ g} \cdot \text{sec}^{-1}$  flüssigen Wasserstoff zu verdampfen, sind 1.14 Watt notwendig.

(2) Die Zelle (Oberfläche  $110 \text{ cm}^2$ ) nimmt als schwarzer Körper 4.46 Watt auf.

Der Emissionskoeffizient hat also den Wert:  $\epsilon_{\text{Zelle}} = 0.26$ .

Dieser niedrige Wert für den Emissionskoeffizienten zeigt, daß der unterhalb der Zelle angebrachte Kälteschild, der eine Temperatur von etwa  $20^\circ\text{K}$  hat, eine gute Isolation gegen Wärmestrahlung ist.

#### 4.3 Bestimmung des Korrekturfaktors zur Wasserstoffdichte

Die aus einer Druckmessung bestimmte Dichte des flüssigen Wasserstoffs in der Zelle muß wegen der Blasenbildung korrigiert werden. Der Korrekturfaktor wird unter folgenden Voraussetzungen ermittelt:

(1) Die Blasenbildung ist gleichmäßig über das Volumen der Zelle verteilt. Der Gasstrom  $S$  nimmt also linear vom unteren zum oberen Zellenrand zu.

(2) Der Elektronenstrahl trifft die Zelle in der Mitte. Der Gasstrom ist an dieser Stelle  $S/2$ .

(3) Die mittlere Steiggeschwindigkeit der Blasen ist  $v \approx 20 \text{ cm} \cdot \text{sec}^{-1}$ , d. h. eine am Zellenboden entstehende Blase erreicht die Oberfläche des flüssigen Wasserstoffs nach etwa  $1/4 \text{ sec}$ .

Der Querschnitt der Blasenbildung in Strahlhöhe ist gegeben durch:

$$\sigma = S/2 \cdot 1/v \text{ cm}^2 \quad (19)$$

$\sigma$  ist die Fläche des Gasstroms. Die Grösse:

$$k = 1 - \sigma/F \quad (20)$$

-  $F$  ist der Querschnitt der Zelle in  $[\text{cm}^2]$  - ist der Korrekturfaktor, mit dem die Dichte des flüssigen Wasserstoffs zu multiplizieren ist.

Für die Grössen  $\sigma/F$  bzw.  $k$  ergeben sich aus der Wärmeaufnahme folgende Werte:

Pro Zeiteinheit verdampfen  $2.51 \cdot 10^{-3}$  g Wasserstoff. Das entspricht bei einer Dichte von  $\rho_{\text{H}_2} = 0.0012 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$  für gesättigten Wasserstoffdampf von  $20^\circ\text{K}$  einem Gasstrom  $S$  von  $2.04 \text{ cm}^3$ . Für die Grösse  $\sigma/F$  folgt daraus mit  $F = 20 \text{ cm}^2$   $\sigma/F = 0.25 \cdot 10^{-2} \hat{=} 0.25 \%$ . Der Korrekturfaktor  $K$  ist also  $0.9975$ .

Dieser Wert gibt sicher nur die Grössenordnung des Korrekturfaktors, weil eine Temperaturmessung am Kondensator nicht die geeignete Methode zur Bestimmung der Wasserstoffdichte ist. Frühere Bestimmungen, die nach photographischen Aufnahmen der Zelle vorgenommen worden sind, haben eine Unsicherheit der mittleren Wasserstoffdichte von weniger als  $0.2 \%$  ergeben <sup>1)</sup>.

## V. DIE DIFFERENTIALGLEICHUNG DER WÄRMELEITUNG

Durch die Untersuchung der Differentialgleichung für Wärmeleitung kann Aufschluß über die vorhandenen Wärmequellen gewonnen werden und über die Verteilung der Wärmeaufnahme über die gesamte Kryostatenoberfläche. Die einzige Wärmequelle in dem unten definierten Sinn ist die Wärmestrahlung. Es wird sich zeigen, daß die Wärmeaufnahme durch Wärmestrahlung während der Beobachtungszeit annähernd konstant ist.

### V.1 Das numerische Verfahren

#### V.1.1 Die allgemeine Form der Differentialgleichung

In einem endlichen Gebiet des dreidimensionalen Raumes hat die Differentialgleichung der Wärmeleitung die allgemeine Form:<sup>9)</sup>

$$\sigma(\vec{x}, u) \cdot \rho(\vec{x}, u) \frac{\partial u}{\partial t} = \sum_{i=1}^3 \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \gamma(\vec{x}, u) \frac{\partial u}{\partial x_i} \right) + A(\vec{x}, u, t) \quad (21)$$

An der Grenzfläche von Kupfer und Stahl gilt:

$$u_{Cu} = u_{St} \quad \left( \gamma \frac{du}{dx_j} \right)_{Cu} = \left( \gamma \frac{du}{dx_j} \right)_{St} \quad (22)$$

Es bedeutet  $u(\vec{x}, t)$  die Temperatur in dem Punkt  $\vec{x} = (x_1, x_2, x_3)$  zur Zeit  $t$ ,  $\rho(\vec{x}, u)$  die Dichte,  $\gamma(\vec{x}, u)$  die Wärmeleitfähigkeit und  $\sigma(\vec{x}, u)$  die spezifische Wärme.  $A(\vec{x}, u, t)$  ist die sogenannte Quellenfunktion, die die in dem Medium vorhandenen Wärmequellen beschreibt. Diese Funktion soll numerisch berechnet werden.

Die einzige vorhandene Wärmequelle ist die von der Streukammer auf den Kryostaten fallende Wärmestrahlung. Die durch die Wärmeleitung zugeführte Wärme ist in dem in Gleichung (21) definierten Sinn keine Wärmequelle, da die Wärmeleitung einer Differentialgleichung ohne den zusätzlichen Term  $A(\vec{x}, u, t)$  genügt. Die Dimension der Funktion  $A(\vec{x}, u, t)$  ist  $[\text{Watt} \cdot \text{cm}^{-3}]$ . Diese Funktion beschreibt also die pro Volumenelement und Zeiteinheit aufgenommene bzw. erzeugte Wärmemenge.

### V.1.2 Vereinfachung der Differentialgleichung

Folgende vereinfachende Annahmen werden gemacht:

- (1) Die Dichte  $\rho(x,u)$  wird als konstant vorausgesetzt (vergl. IV.2.1).
- (2) Das Problem ist eindimensional (vergl. IV.1.1).

Die vereinfachte Differentialgleichung hat dann die Form:

$$\rho \cdot \sigma(x,u) \frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \gamma(x,u) \cdot \frac{\partial u}{\partial x} \right) + A(x,u,t) \quad (22a)$$

### V.1.3 Das gewöhnliche Differenzverfahren

Die Funktion  $A(x,u,t)$  wird nach dem gewöhnlichen Differenzverfahren<sup>12)</sup> berechnet. In der  $x$ - $t$ -Ebene wird ein rechteckiges Gitter derart konstruiert, daß bei beliebig gewähltem Anfangspunkt  $(x_0, t_0)$  jedem Gitterpunkt Koordinaten  $(x_i, t_j)$  zugeordnet werden können mit:

$$\begin{aligned} x_i &= x_0 + i \cdot h \\ t_j &= t_0 + j \cdot h \end{aligned} \quad i, j = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (23)$$

$h$  und  $k$  heißen Gitterabstände.

Die Werte der Funktion  $u$  im Punkt  $(x_i, t_j)$  werden mit  $u_{i,j}$  bezeichnet. Der zur Funktion  $u$  im Punkt  $(x_i, t_j)$  nach dem Differenzverfahren berechnete Näherungswert wird mit  $U_{i,j}$  bezeichnet. Die Differentialquotienten werden nach folgendem Schema durch Differenzenquotienten ersetzt:

$$\begin{aligned} \left( \frac{\partial u}{\partial t} \right)_{i,j} &\longrightarrow \frac{U_{i,j+1} - U_{i,j}}{k} \\ \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)_{i,j} &\longrightarrow \frac{U_{i+1,j} - U_{i,j}}{h} \\ \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \right)_{i,j} &\longrightarrow \frac{U_{i+1,j} - 2U_{i,j} + U_{i-1,j}}{h^2} \end{aligned} \quad (24)$$

Die Wärmeleitung  $\gamma$  und die spezifische Wärme  $\sigma$  sind als Funktionen der Temperatur bekannt<sup>10)</sup>,

Aus der eindimensionalen Differentialgleichung (22a) ergibt sich damit folgende Differenzengleichung:

$$\sigma \cdot \rho_{i,j} \frac{U_{j,i+1} - U_{i,j}}{k} = \frac{\gamma_{i+1,j} - \gamma_{i,j}}{h} (U_{i+1,j} - U_{i,j}) + \gamma_{i,j} \frac{U_{i+1,j} - 2U_{i,j} + U_{i-1,j}}{h^2} + A_{i,j} \quad (25)$$

Diese Gleichung wird nach den Matrixelementen  $A_{i,j}$  aufgelöst.

#### V.1.4 Test des numerischen Verfahrens

Die Werte  $A_{i,j}$  sind abhängig von den Gitterabständen  $h$  und  $k$ . Bei einer Verfeinerung der Gitterabstände müssen die Werte für die  $A_{i,j}$  konvergieren. Die Konvergenz des Verfahrens wird durch die eindimensionale Differentialgleichung der Diffusion:<sup>9)</sup>

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \cdot \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + v \frac{\partial c}{\partial x} \quad (26)$$

getestet, deren Lösung bekannt ist.  $c$  bedeutet die Konzentration,  $v$  die Geschwindigkeit und  $D$  den Diffusionskoeffizienten. Zur Vereinfachung wird  $v = D = 1$  gesetzt.

Ein Vergleich mit der Gleichung (22) zeigt, daß die Ableitung  $\frac{\partial c}{\partial x}$  als Matrix  $A_{i,j}$  interpretiert werden kann. Die Grösse  $\frac{\partial c}{\partial x}$  wird aus der in eine Differenzengleichung umgeformten Gleichung (26) für verschiedene Gitterabstände  $h$  und  $k$  berechnet und mit dem aus der bekannten Lösung  $c$  berechneten Wert der Ableitung verglichen.

Um eine Abweichung von weniger als 2 % zu erhalten, müssen die Gitterabstände bis 0.125 verfeinert werden. Die Abweichung dieser Werte von denen, die bei einem Gitterabstand von 0.25 erhalten werden, ist kleiner als 3%.

#### V.1.5 Berechnung der $A_{i,j}$

Zur Berechnung der  $A_{i,j}$  wird der Nullpunkt der  $x$ -Achse am unteren Rand des Kondensators gewählt. Die anfänglich gewählten Gitterabstände sind:  $n = 1 \text{ cm}$ ,  $k = 1 \text{ min}$ .



Die Gitterabstände werden verfeinert bis  $h = 0.125$  cm,  $k = 0.25$  min.

Die Änderung der Werte der  $A_{i,j}$ , bezogen auf die berechneten Werte bei doppeltem Gitterabstand, beträgt dabei weniger als 2.5 %, d.h. sie bleibt in der Größenordnung der Genauigkeit der Temperaturmessungen.

#### V.1.6 Ergebnisse und Diskussion

Die Matrixelemente  $A_{i,j}$  sind die Werte der pro Volumenelement und Zeiteinheit aufgenommenen Wärmemenge.

(1) Die Matrixelemente  $A(x,u,t)$  sind für  $x = \text{const}$  innerhalb eines Fehlers von 3.3 % konstant, die zur Kontrolle gebildeten Summen der  $A_{i,j}$  ( $i = \text{const}$ ) innerhalb eines Fehlers von 2.4 %.

(2) Der Verlauf der  $A_{i,j}$  für  $t = \text{const}$  ist in Abb. 18 gezeigt.

Die Wärmeaufnahme des Kryostaten durch Wärmestrahlung ist also während der gesamten Beobachtungszeit annähernd konstant. Eine Abschätzung der Leistung der Wärmestrahlung zeigt, daß sich diese während der Beobachtungszeit nur um 4 % ändert. Die gesamte vom Kryostaten durch Wärmestrahlung aufgenommene Leistung beträgt  $(11.5 \pm 0.3)$  Watt. Davon nimmt der Kondensator 7.5 Watt auf, die anderen 4 Watt entfallen auf den Vorkühler und den Hals. Dieser Wert ist um 1.5 Watt höher als der durch die Gleichung (13) abgeschätzte, der ja nur ein Näherungswert ist. Wie sich die 11.5 Watt über den Kryostaten verteilen, zeigt die Abb. 18. Die Wärmeaufnahme am Kondensator liegt im Mittel bei etwa 0.5 Watt pro Volumenelement, am Vorkühler bei 0.08 Watt, am Hals bei etwa 0.009 Watt.

Die äußerst geringe Wärmeaufnahme am Vorkühler und Hals, wie sie sich im Verlauf der Kurve darstellt, lässt erkennen, daß die Isolation gegen die Wärmestrahlung ausreichend ist. Selbst bei den tiefen Temperaturen am Kondensator wird die Wärmeaufnahme durch Wärmestrahlung um den Faktor 3 reduziert.

Im stationären Zustand beträgt die Wärmeaufnahme durch Wärmeleitung 1.2 Watt.

#### VI. ZUSAMMENFASSUNG

Das beschriebene Kondensationstarget mit Fremdkühlung durch ein Gasumlauf-

system benutzt eine Philips-Kältemaschine vom Ty PGH-105 zur Erzeugung der notwendigen Kühlleistung. Die Kühlung erfolgt über ein Transfersystem, das mit Heliumgas von 20 atm Druck gefüllt ist. Das Target wird von einem Füllstand bedient und gesteuert. Die Verwendung von elektromagnetischen Ventilen ermöglicht eine Fernbedienung des Füllstandes von der Experimentekontrolle.

Die am Kryostaten durchgeführten Temperaturmessungen haben zu folgenden Ergebnissen geführt:

Die am Target zur Verfügung stehende Kühlleistung ist ausreichend. Nach etwa 60 - 70 min beträgt die Temperatur des Kondensators  $20^{\circ}\text{K}$ . Nach dieser Zeit ist die Zelle mit flüssigem Wasserstoff gefüllt. Doch erst nach etwa 220 min ist eine stationäre Temperaturverteilung am Kryostaten erreicht. Der zeitliche Verlauf der Wärmeabgabe und -aufnahme zeigt, daß das thermische Verhalten des Kryostaten nur durch die Wärmekapazität des Kondensators bestimmt ist. Weiterhin hat sich erwiesen, daß die Wärmeaufnahme durch Wärmeleitung (1 Watt) gegenüber der Wärmeaufnahme durch Wärmestrahlung (10 Watt) vernachlässigt werden kann. Dies konnte durch die Ergebnisse der Auswertung der Differentialgleichung der Wärmeleitung bestätigt werden. Eine Abschätzung der mittleren Dichteschwankung des flüssigen Wasserstoffs in der Zelle auf Grund der Blasenbildung ergab einen Wert von 0.25 %. Dieser Wert ist eine obere Grenze für die Dichteschwankung.

Zur Zeit ist der Bau eines neuen Kryostaten geplant (Abb. 19). Dieser wird im Gegensatz zum beschriebenen Kryostaten keinen Vorkühler haben und einen verkürzten Wasserstoffkreislauf benutzen. Der aus der Zelle verdampfende Wasserstoff wird hierbei nicht mehr über den Füllstand zum Kühler zurückgeführt, sondern vom Kondensator aufgefangen und erneut einkondensiert. Damit wird eine bessere Ausnutzung der Kühlleistung erreicht.

LITERATURVERZEICHNIS

1. W. Bartel, DESY Interner Bericht F22-69/3
2. W. Bartel, private Mitteilung
3. Hydrogen Handbook, ed. Arthur P. Little INC,  
Cambridge Massachuchetts 1960  
R. Prydz, The Thermodynamic Properties of Deuterium, NBS-Report 9276
4. G. J. Haarhuis, Weiterentwicklung des Philips-Stirling-Systems, ein  
Kryogenerator zur Erzeugung von Temperaturen bis  $4.2^{\circ}\text{K}$  und tiefer.  
J. Weinhold, Beispiele für den Einsatz eines universellen Tief-  
temperatur-Kryogenerators (Philips-Stirling-System)  
Beide in: Dechema Monographien Bd. 58,  
Tieftemperaturtechnik, Verlag Chemie GmbH, 1968
5. R. Barron, Cryogenic Systems, Mc Craw Hill, 1966
6. F. Kohlrausch, Praktische Physik Bd. 3  
B. G. Teubener 1968
7. G. Keßler, private Mitteilung
8. Mathematische Hilfsmittel des Ingenieurs, Hrsg. von R. Sauer und I.  
Szabó, Bd. 3 Springer Verlag 1968  
A. Ralston, H. S. Wilf, Mathematische Methoden für Digitalrechner,  
Bd. 1, R. Oldenbourg Verlag 1969
9. P. Frank, R. von Mises, Die Differential- und Integralgleichungen der  
Mechanik und Physik Bd. 2, F. Vieweg und Sohn 1961
10. Properties of Materials at Low Temperature (Phase I), ed. V. J. Johnson,  
Pergamon Press 1960
11. M. Adelberg, Effektive Thermal Conductivity and Multilayered Insulation  
In: Advances of Cryogenic Engineering, Vol 12, ed. K.D. Timmerhaus
12. L. Collatz, Numerische Behandlung von Differentialgleichungen, Springer  
Verlag 1955

DANKSAGUNG

Unser besonderer Dank gilt dem Herrn G. Rogner und P. Lüthke für die Konstruktion des ersten bzw. vereinfachten zweiten Kryostaten. Der Werkstatt des II. Institut für Experimentalphysik unter Herrn Werner danken wir für die mustergültige Ausführung der mechanischen Arbeiten.

Eine wertvolle Hilfe bei der Lösung technischer Probleme waren die Herren J. Bech, D. Herrman und V. Masbender. Den Mitgliedern der DESY-Gruppe F22, Herrn Prof. G. Weber, Dr. F.W. Büßer, R. Felst, H. Krehbiel, J. Mc Elroy sowie den Herren W.R. Dit, D. Harms, P.E. Kuhlmann und J. Meyer danken wir für ihre Hilfe und viele anregende Diskussionen.

Herrn W. Knaut sei an dieser Stelle gedankt für die Anfertigung der Zeichnungen.

Verzeichnis der Abbildungen

<u>Abb. 1</u>	Targettypen
<u>Abb. 2</u>	Skizze der Gesamtanlage
<u>Abb. 3</u>	a) Stirlingzyklus b) Arbeitsdiagramm
<u>Abb. 4</u>	Wasserstoffkryostat Die Ziffern 1 - 9 kennzeichnen die Positionen der Thermoelemente
<u>Abb. 5</u>	Wärmeleitfähigkeit von Kupfer und Stahl
<u>Abb. 6</u>	Füllstand
<u>Abb. 7</u>	Schaltung der Ventile
<u>Abb. 8</u>	Eichkurve des Chromnickel-Konstanten Thermoelements
<u>Abb. 9</u>	Experimentelle Bestimmung der Thermoelement Eichkurve und Vergleich mit Angaben aus der Literatur.
<u>Abb. 10</u>	Temperaturverteilung längs des Kryostaten.
<u>Abb. 11</u>	Abkühlkurven
<u>Abb. 12</u>	Aufwärmekurve des evakuierten Kryostaten
<u>Abb. 13</u>	Aufwärmekurve des mit Wasserstoff gefüllten Kryostaten
<u>Abb. 14</u>	Aufwärmekurve mit Gegenheizung
<u>Abb. 15</u>	Wärmestrom durch den Kryostaten
<u>Abb. 16</u>	Wärmeentzug bei Abkühlung
<u>Abb. 17</u>	Wärmeaufnahme des Kryostaten
<u>Abb. 18</u>	Quellfunktion der Wärmeleitungsgleichung
<u>Abb. 19</u>	Weiterentwicklung des Kryostaten
<u>Abb. 20</u>	Vakuumsystem



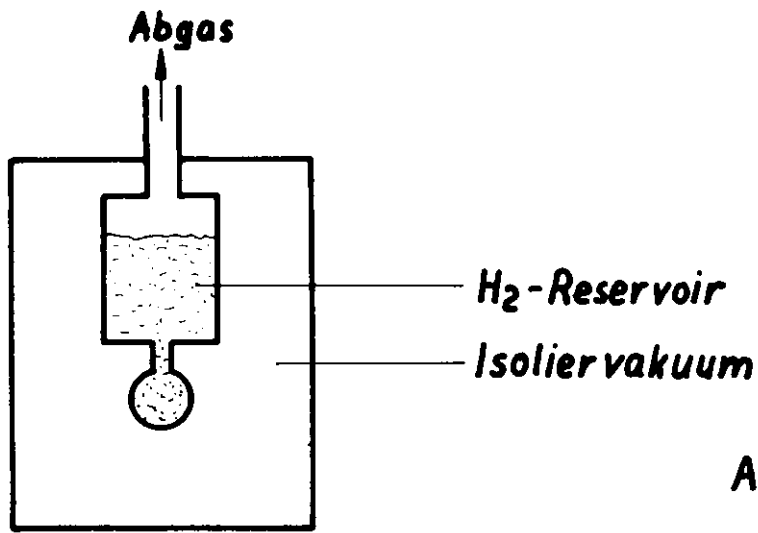


Abb. 1a

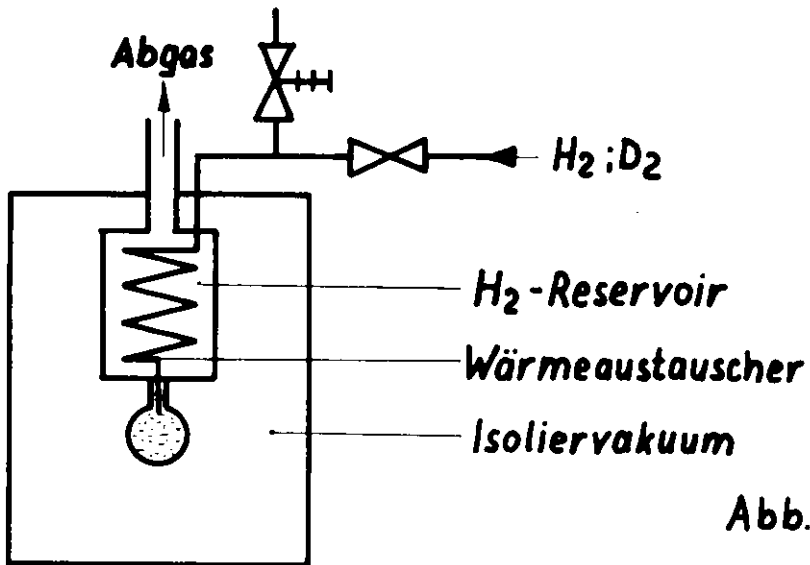


Abb. 1b

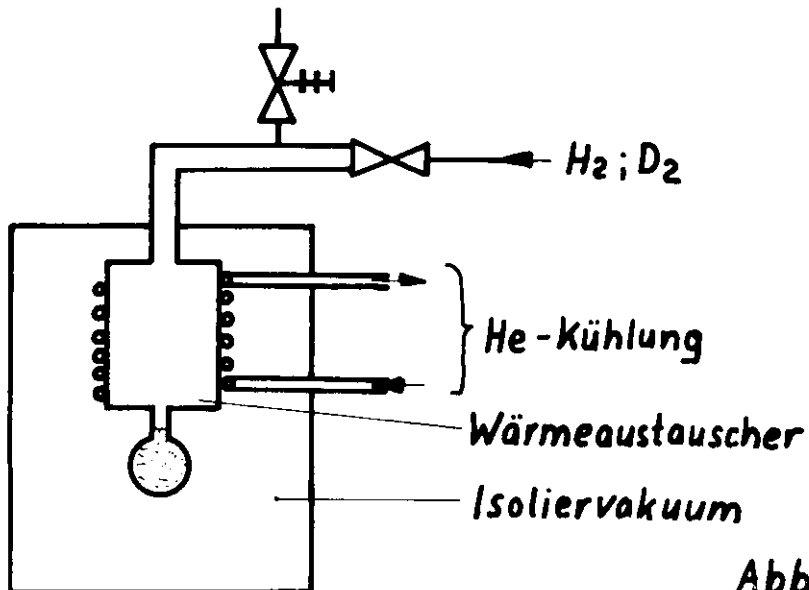


Abb. 1c





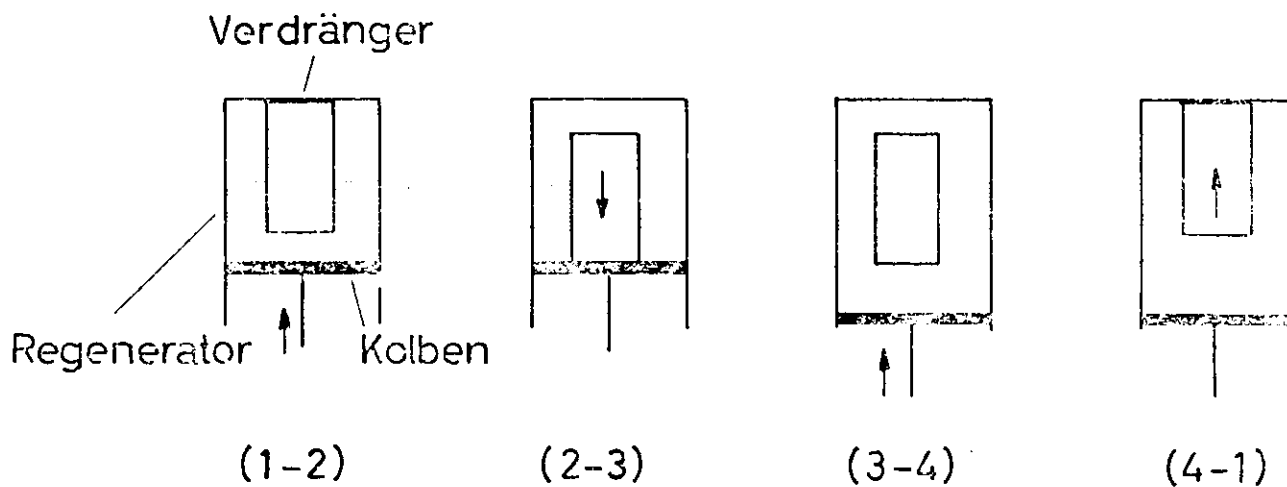


Abb. 3a

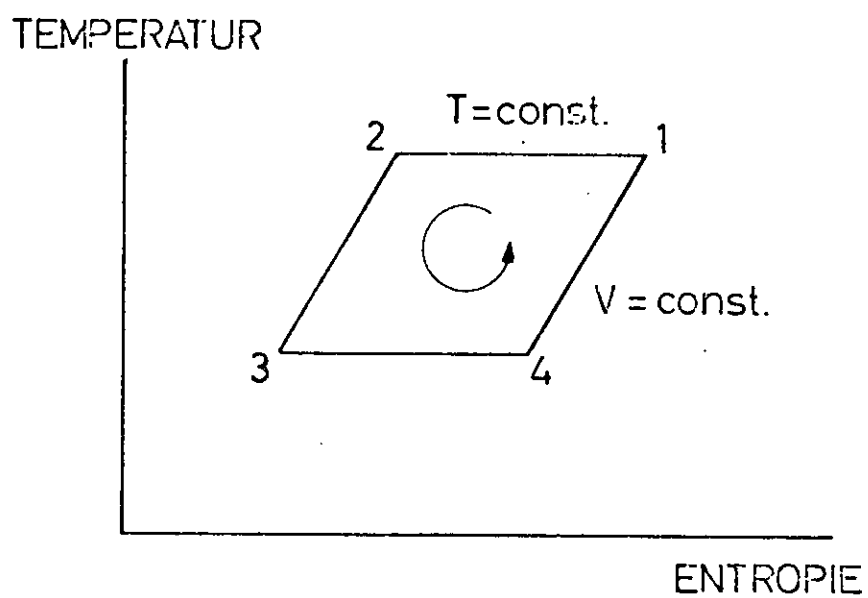


Abb. 3b

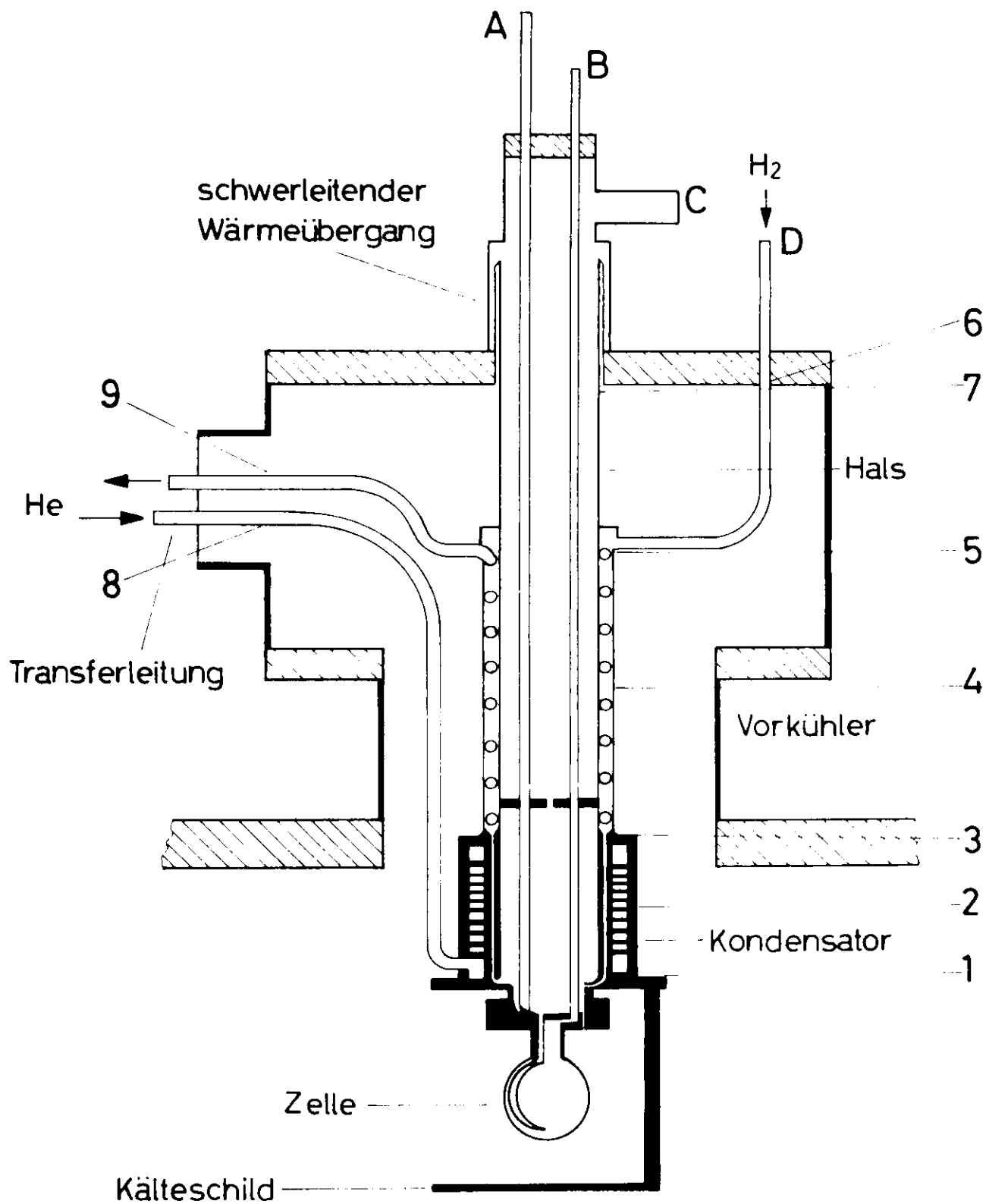


Abb. 4

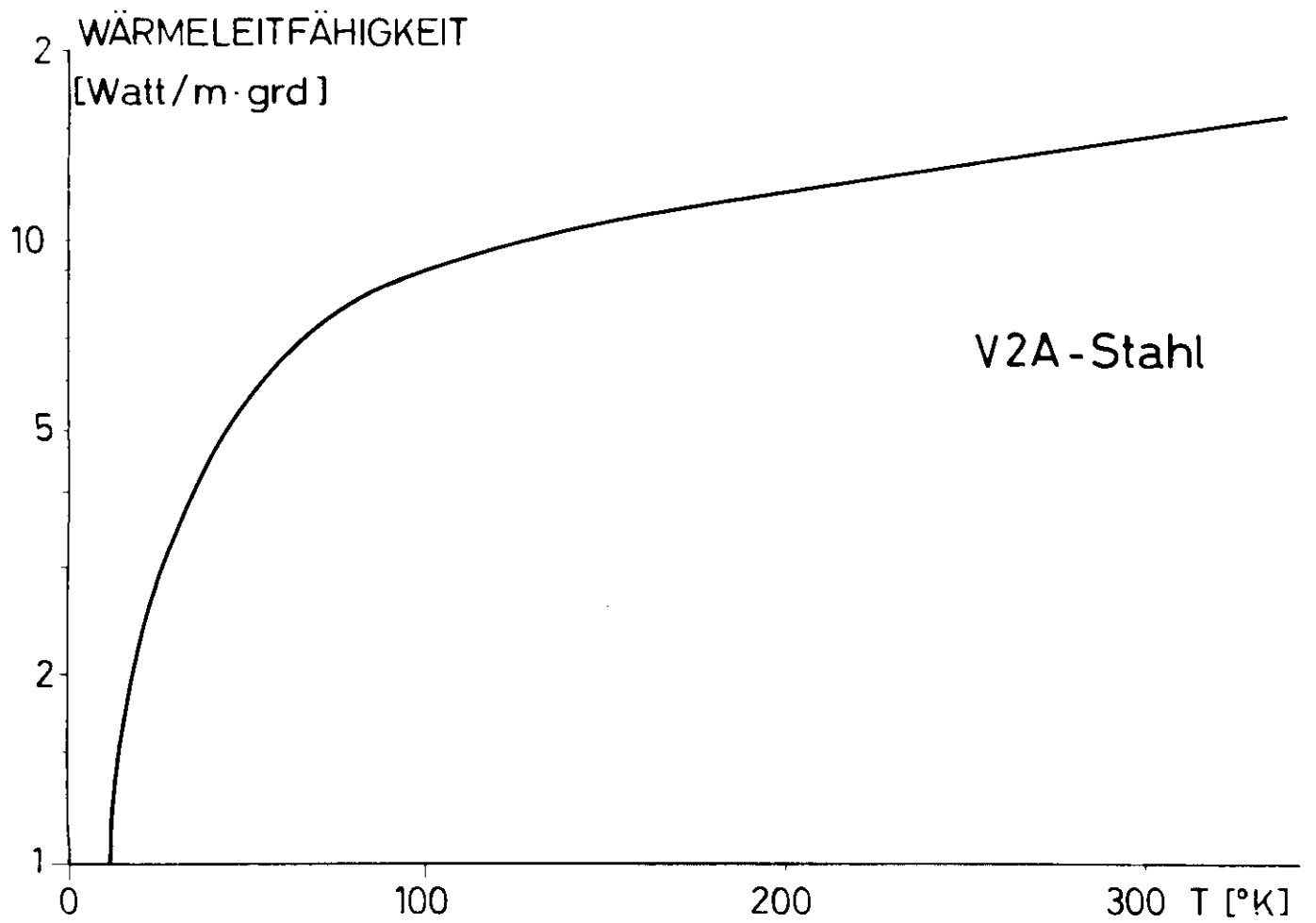
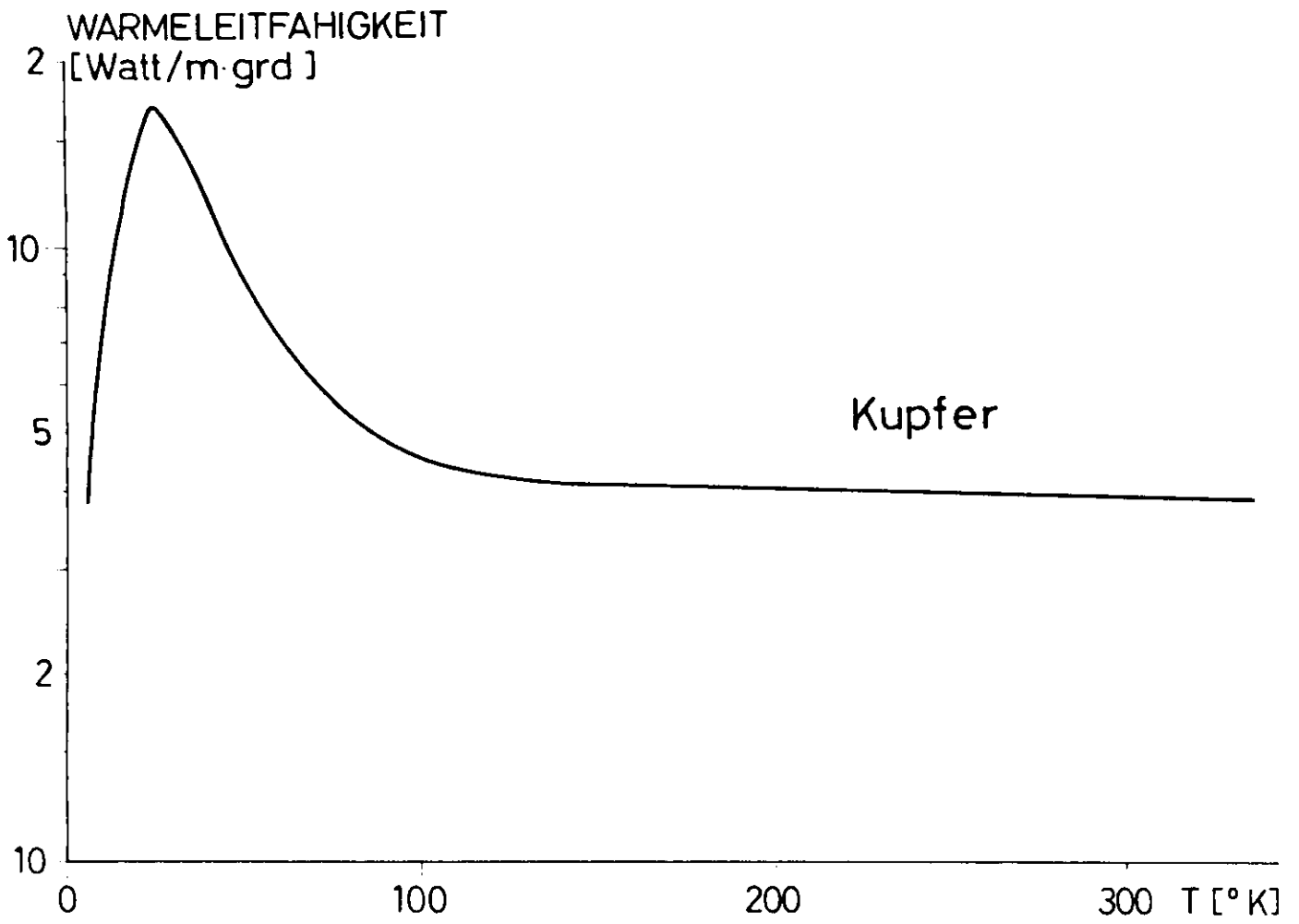
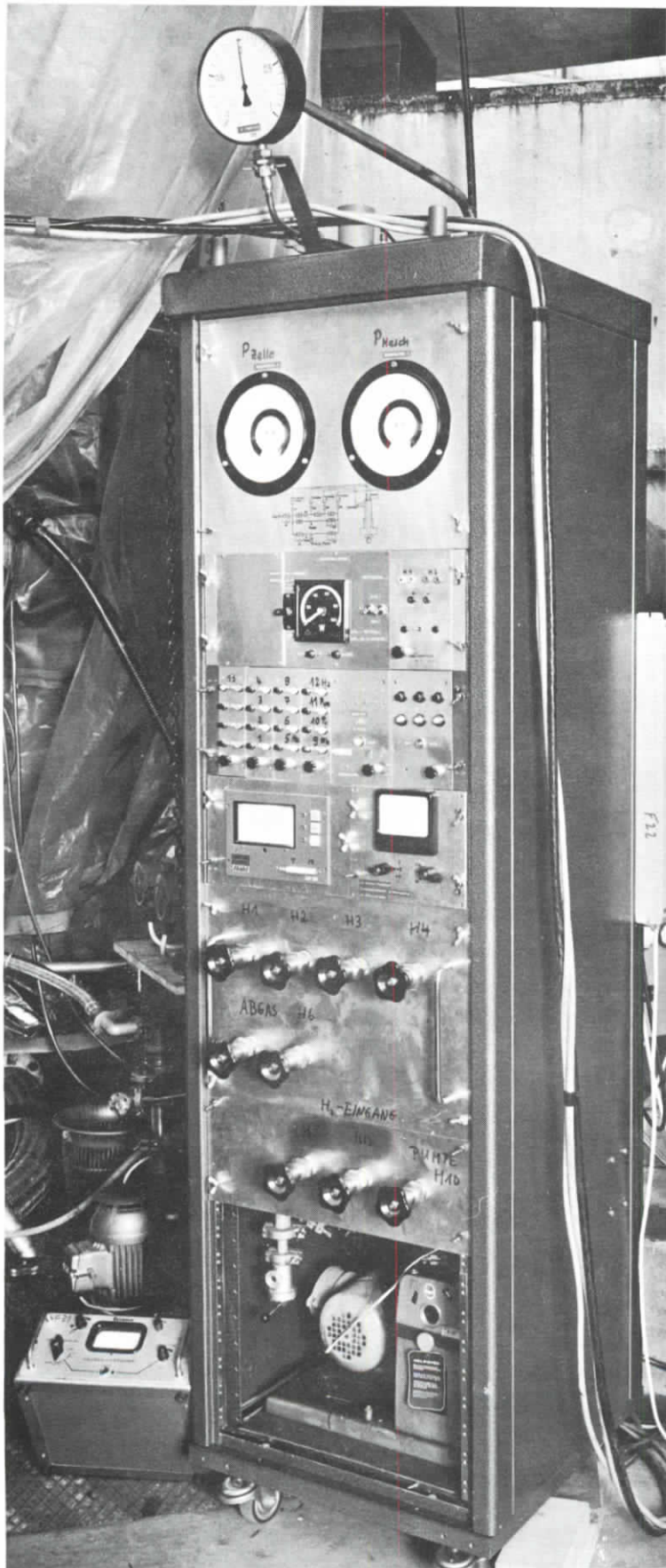


Abb. 5



1

2

3

4

5

6

7

Abb.6

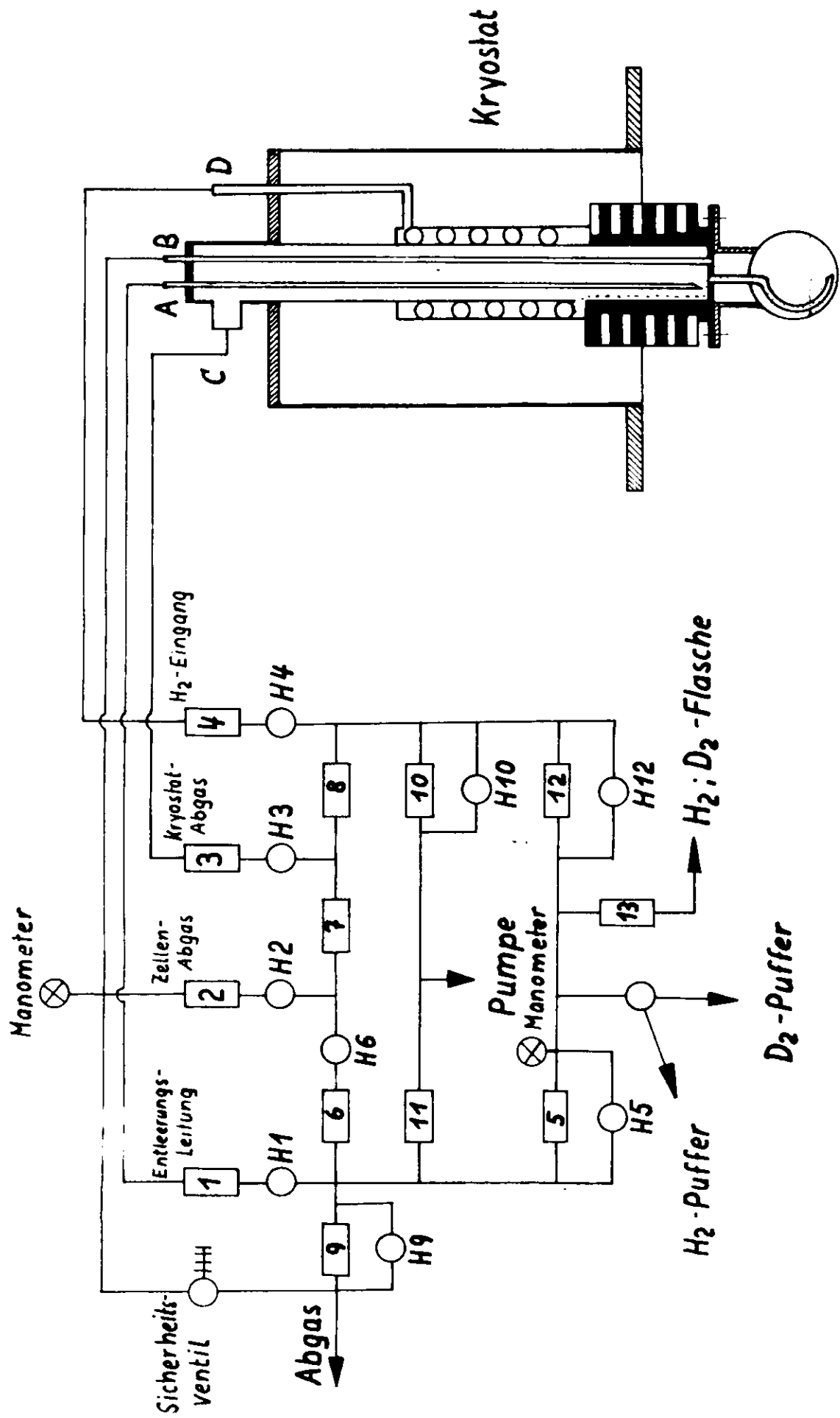
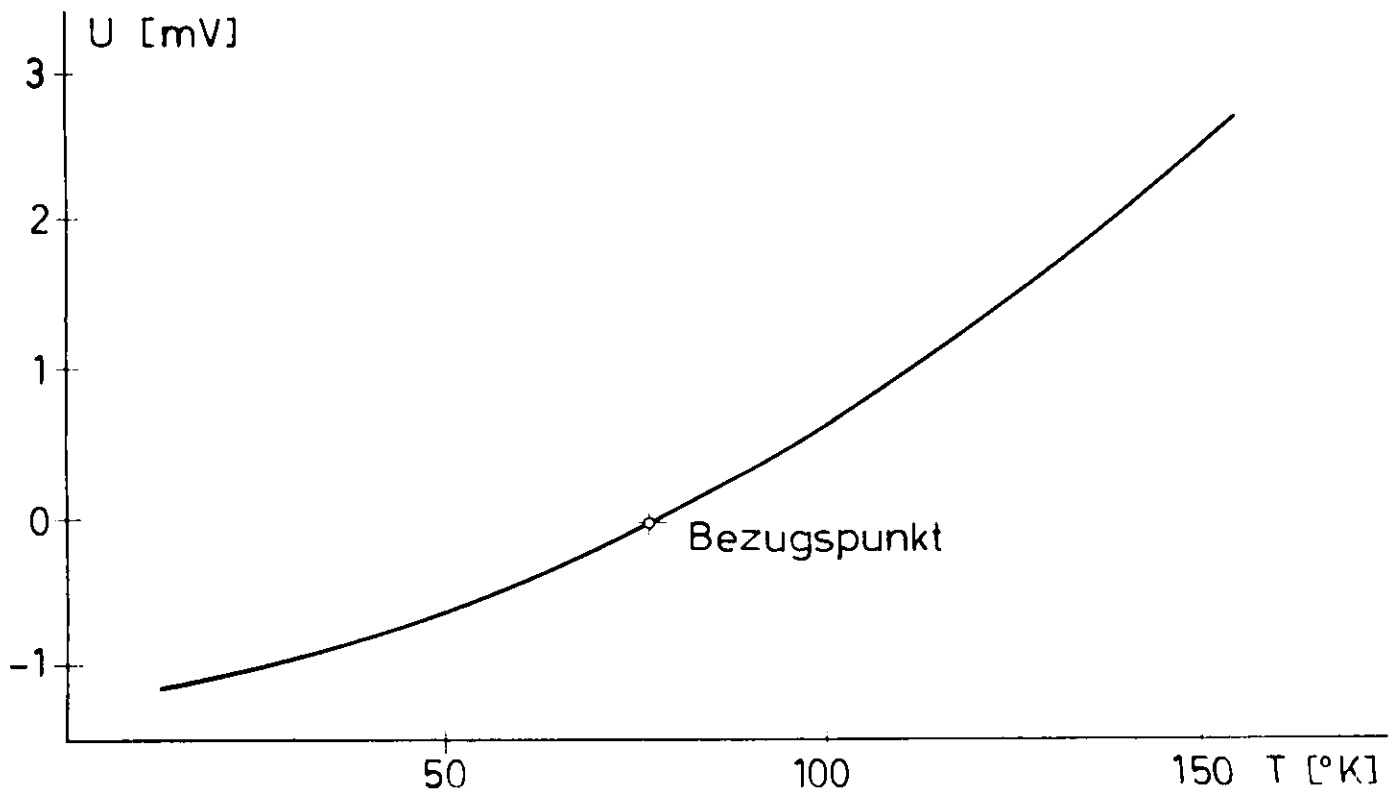
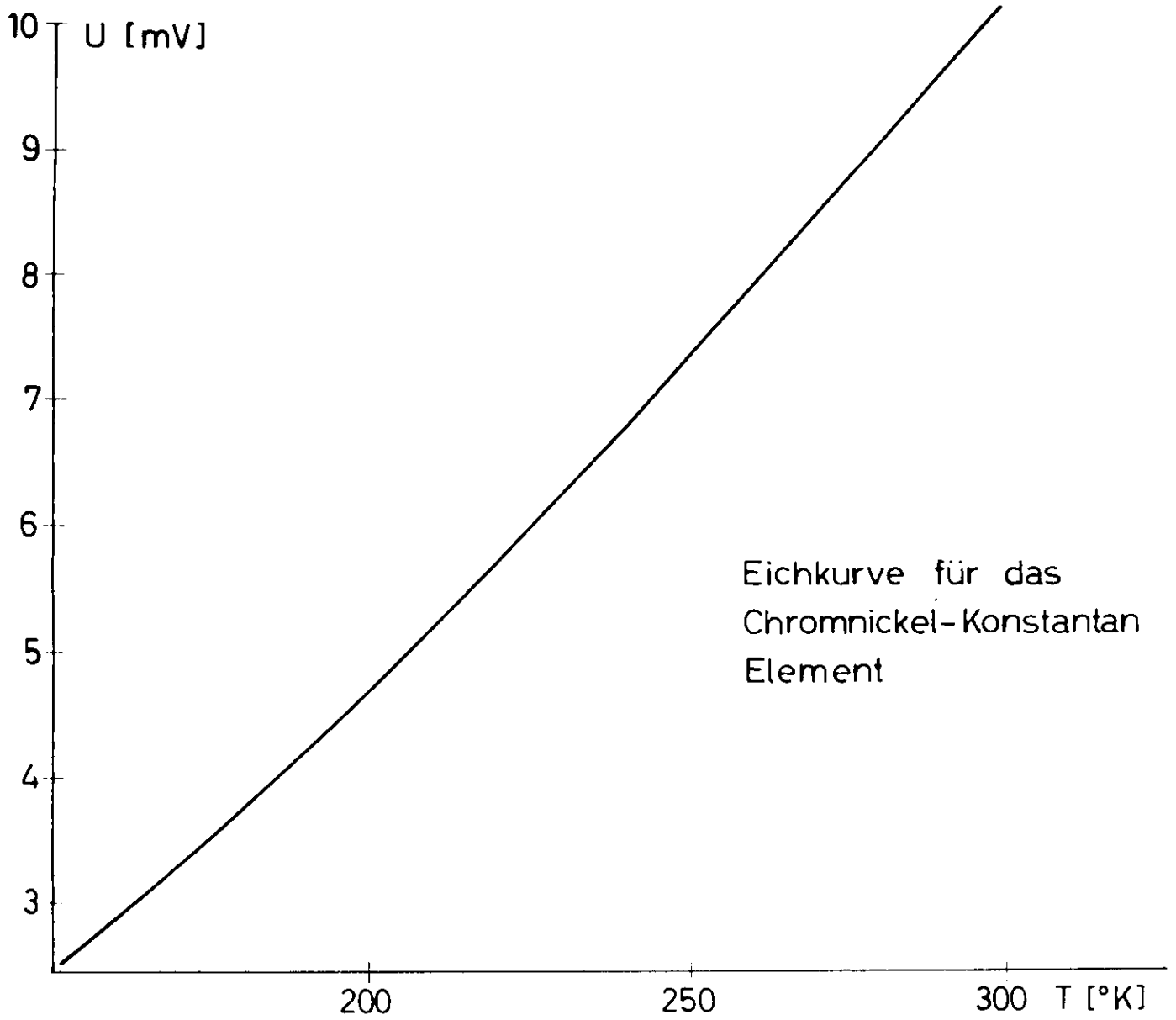


Abb. 7



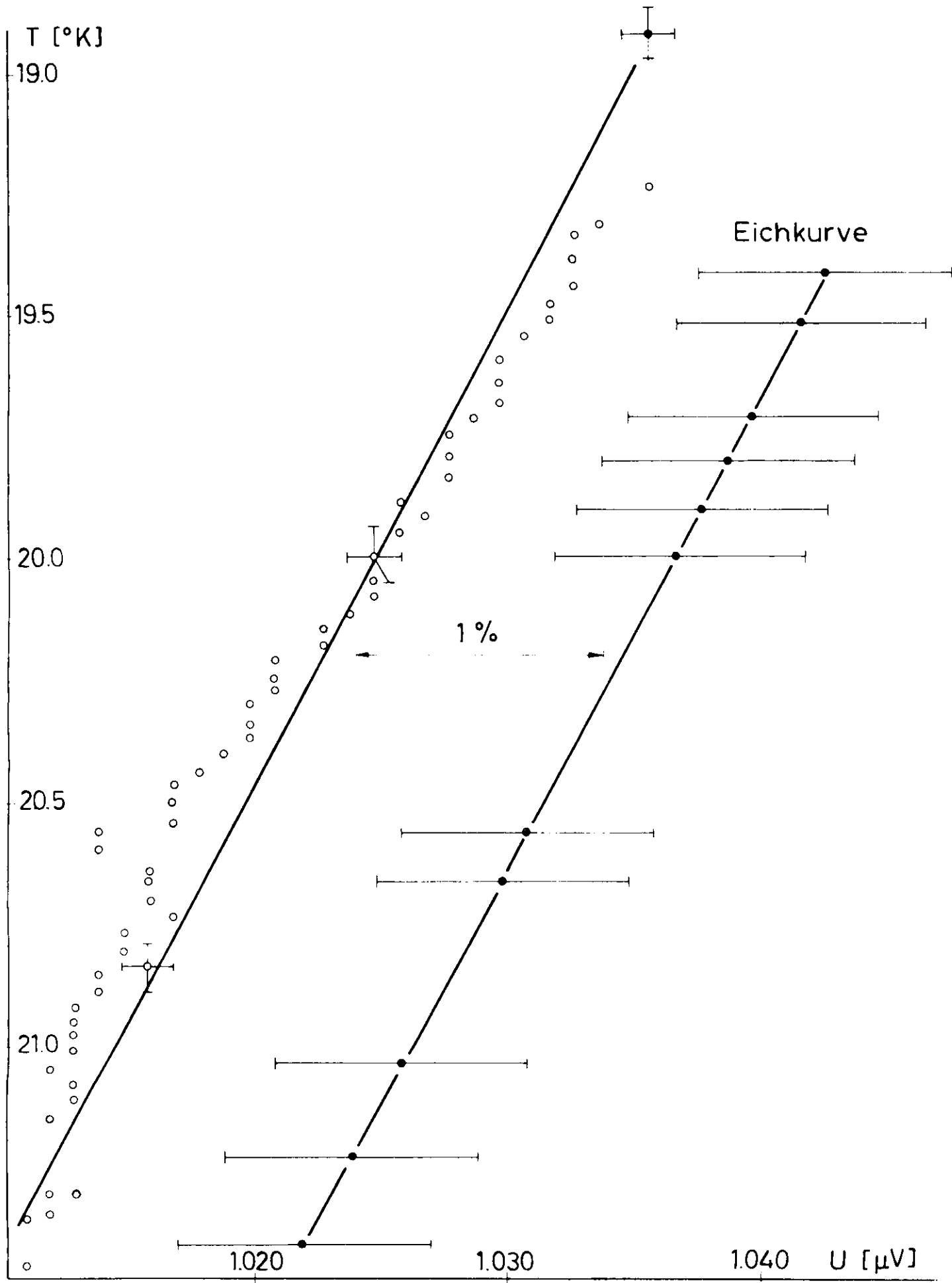


Abb. 9

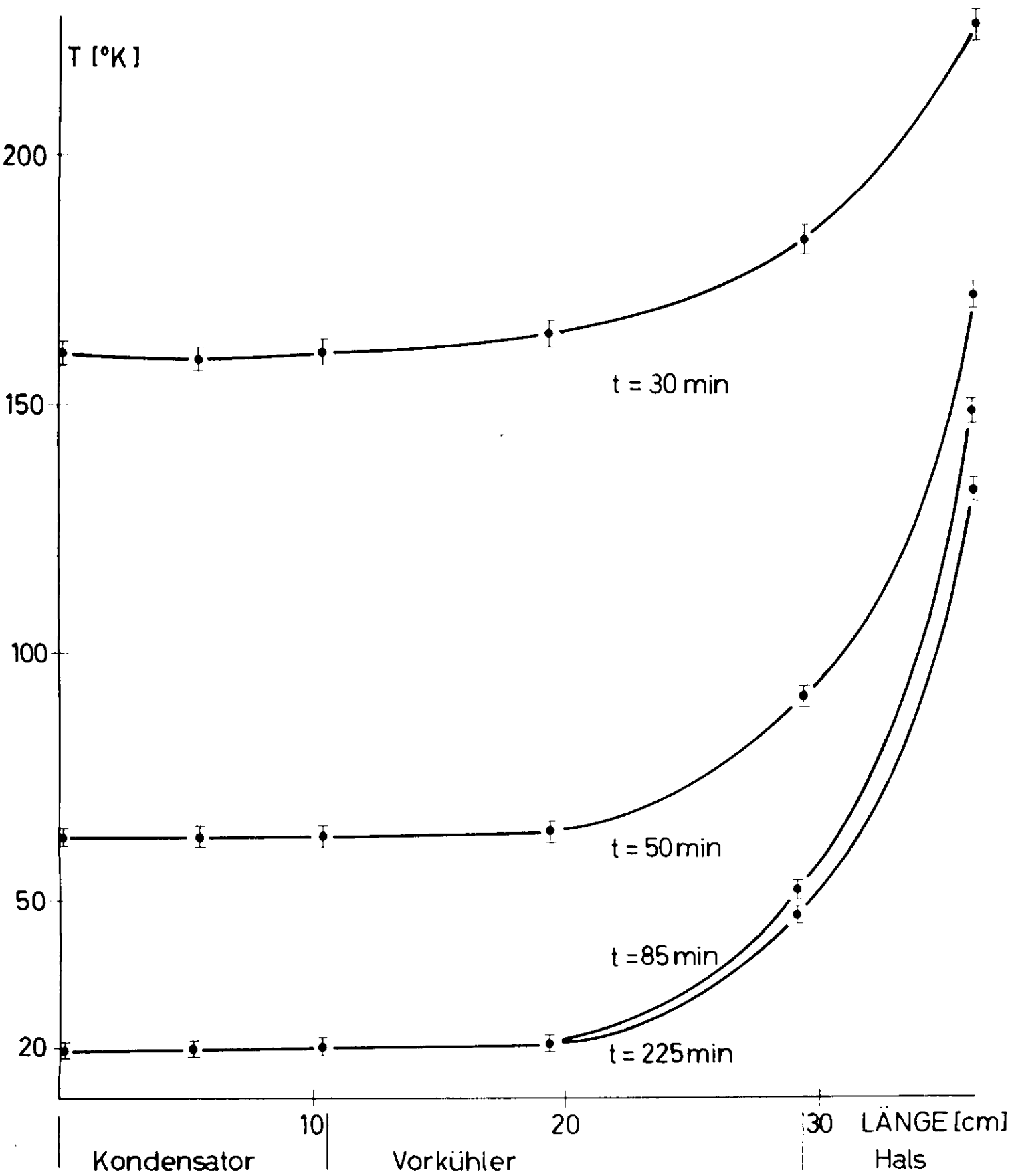
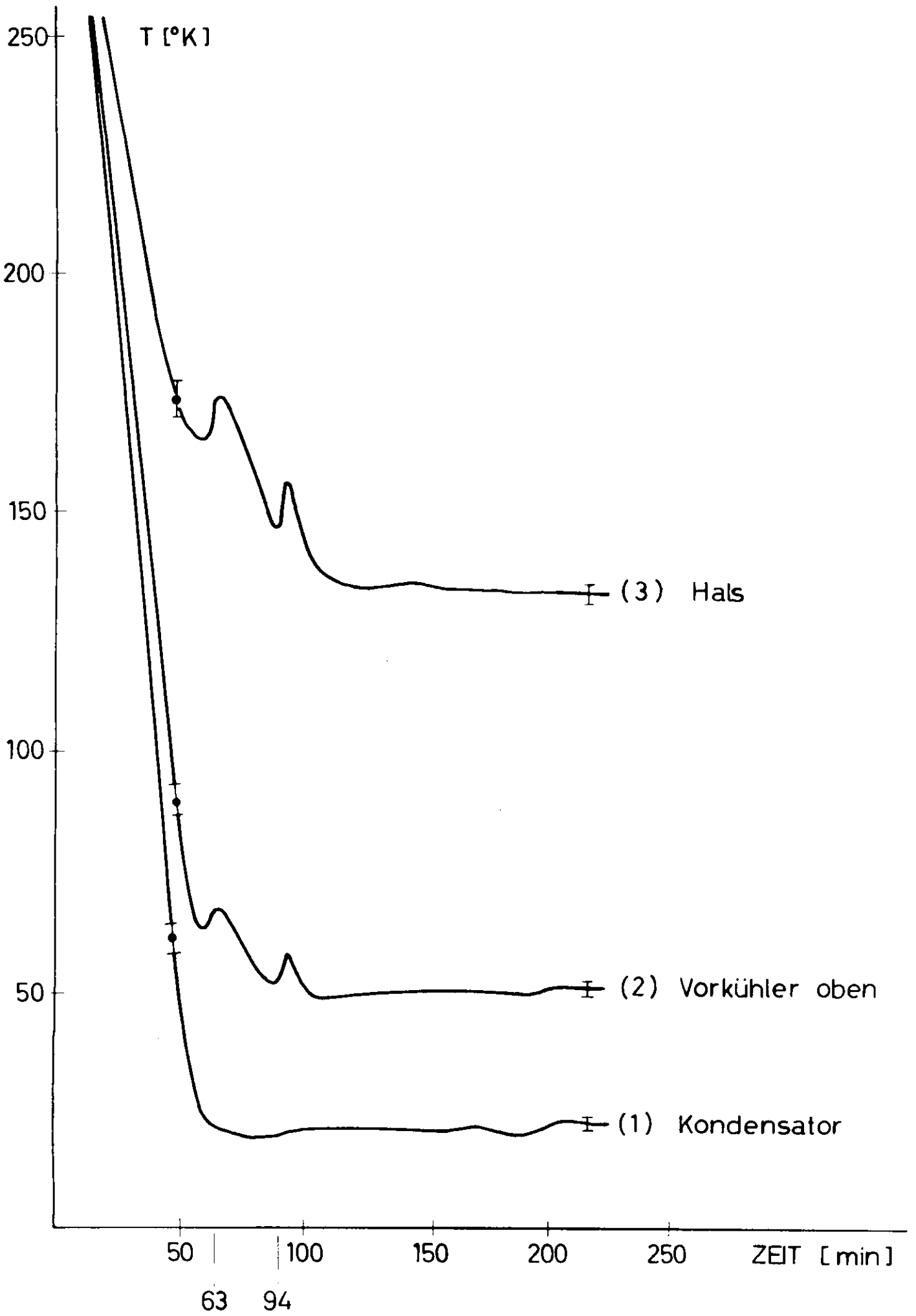


Abb.10





Kurve I

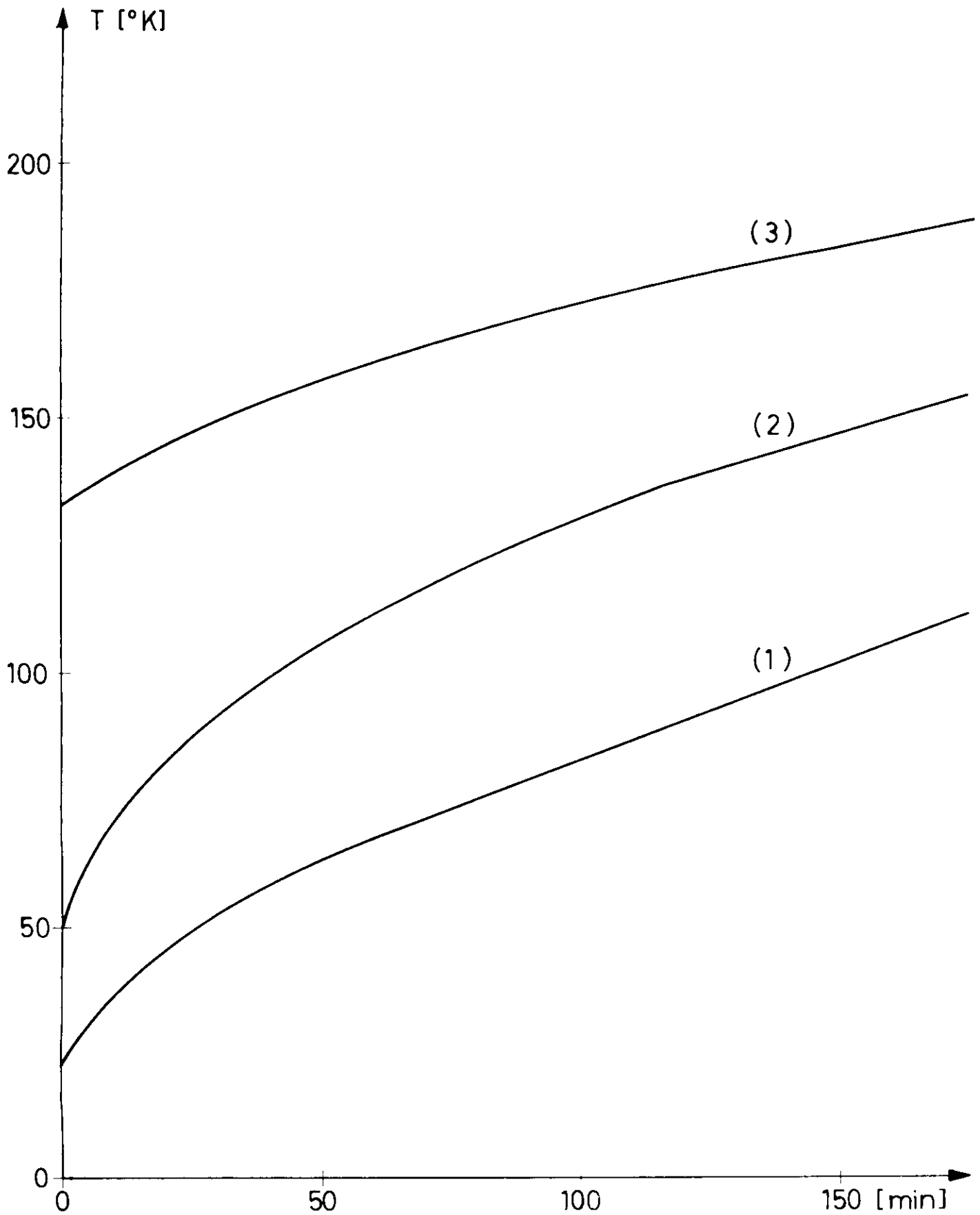


Abb. 12

Kurve II

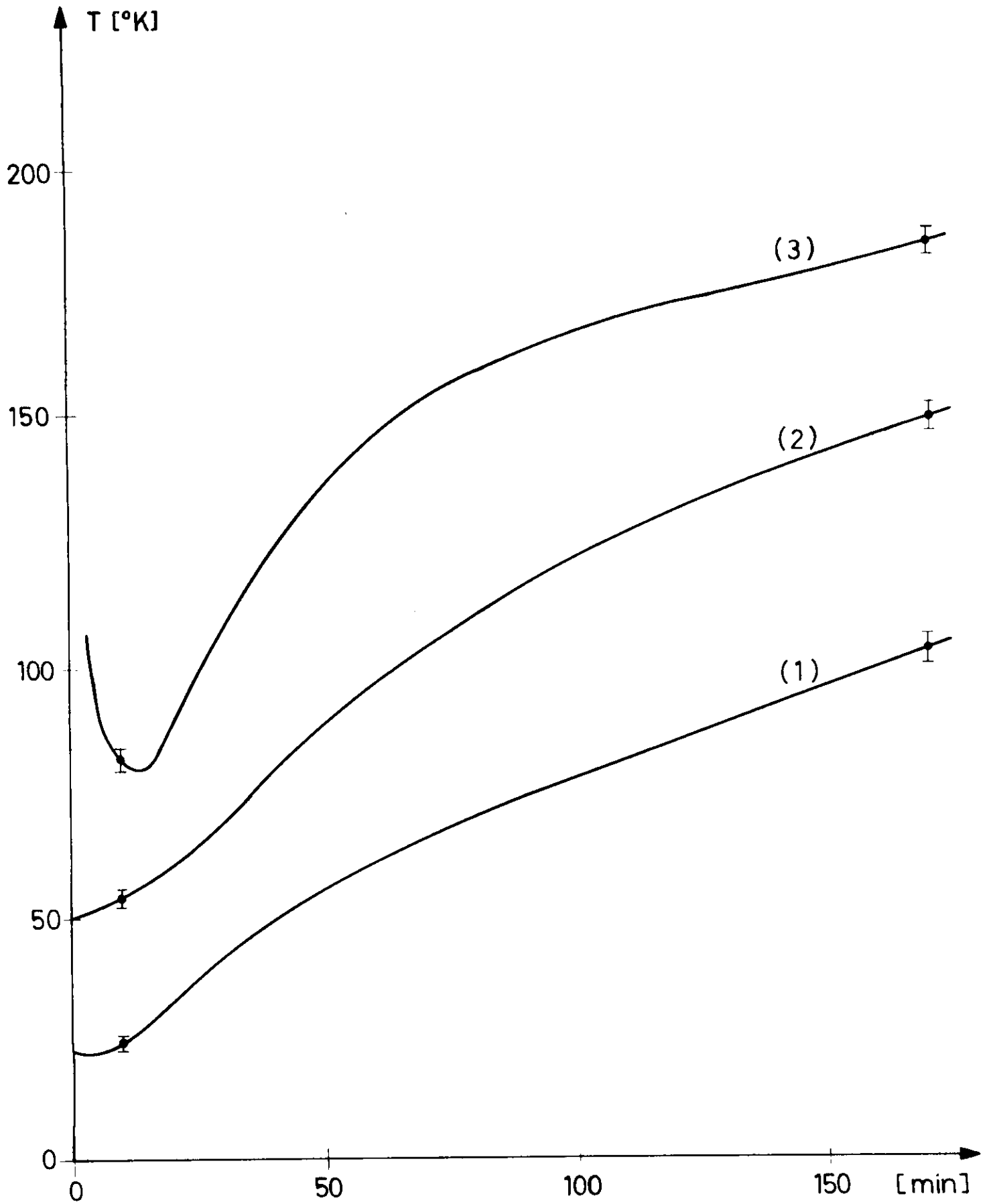


Abb. 13

Kurve III

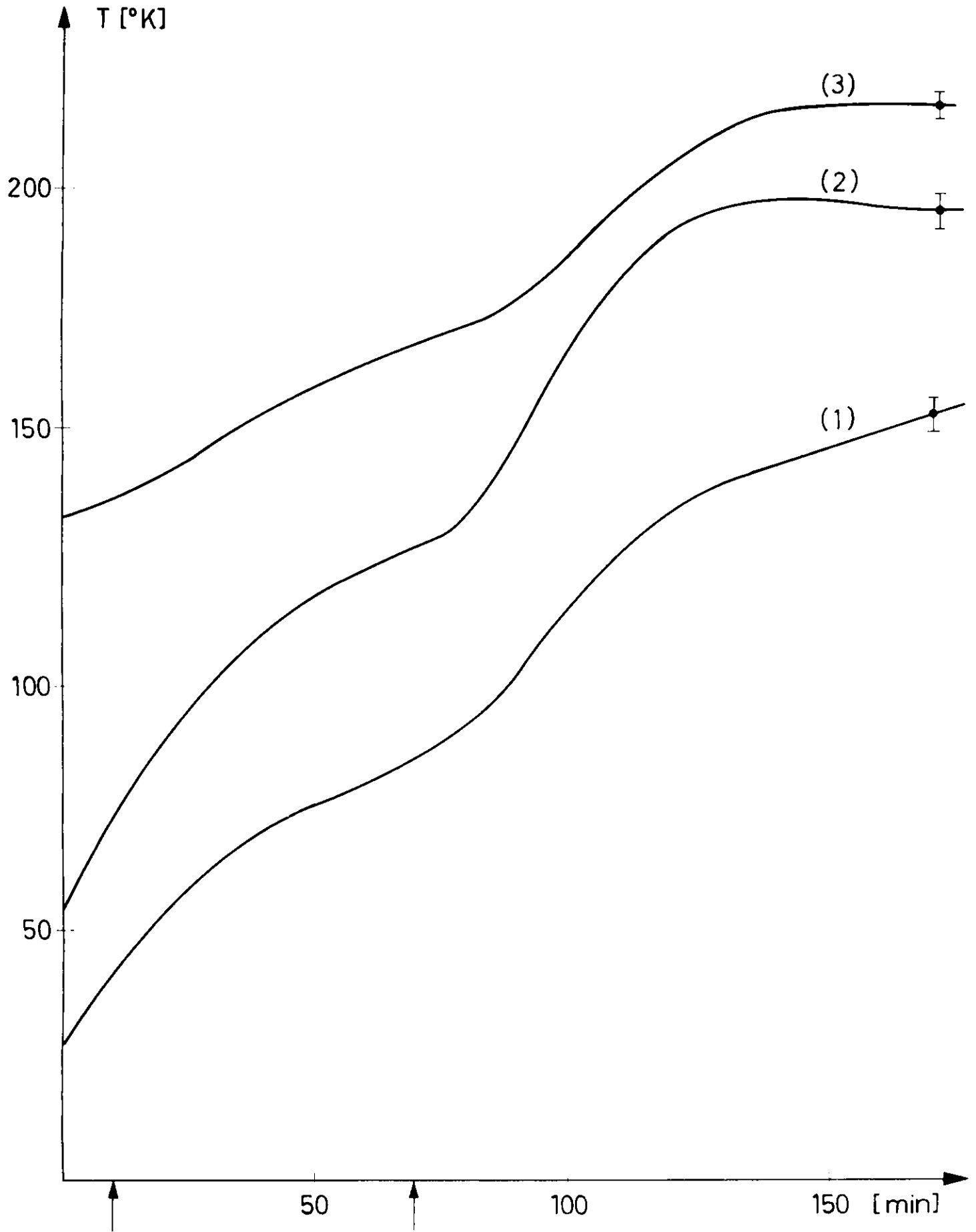


Abb. 14

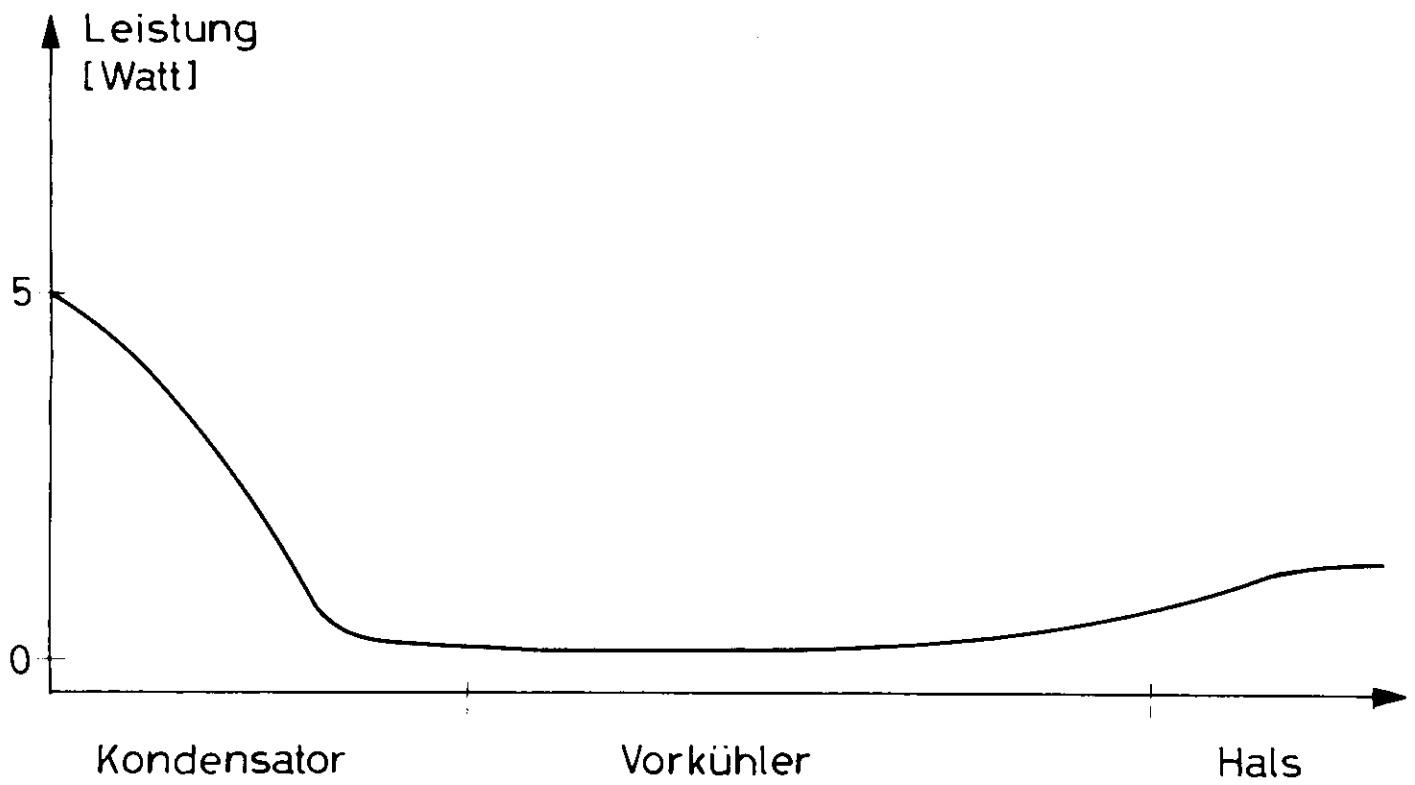


Abb. 15

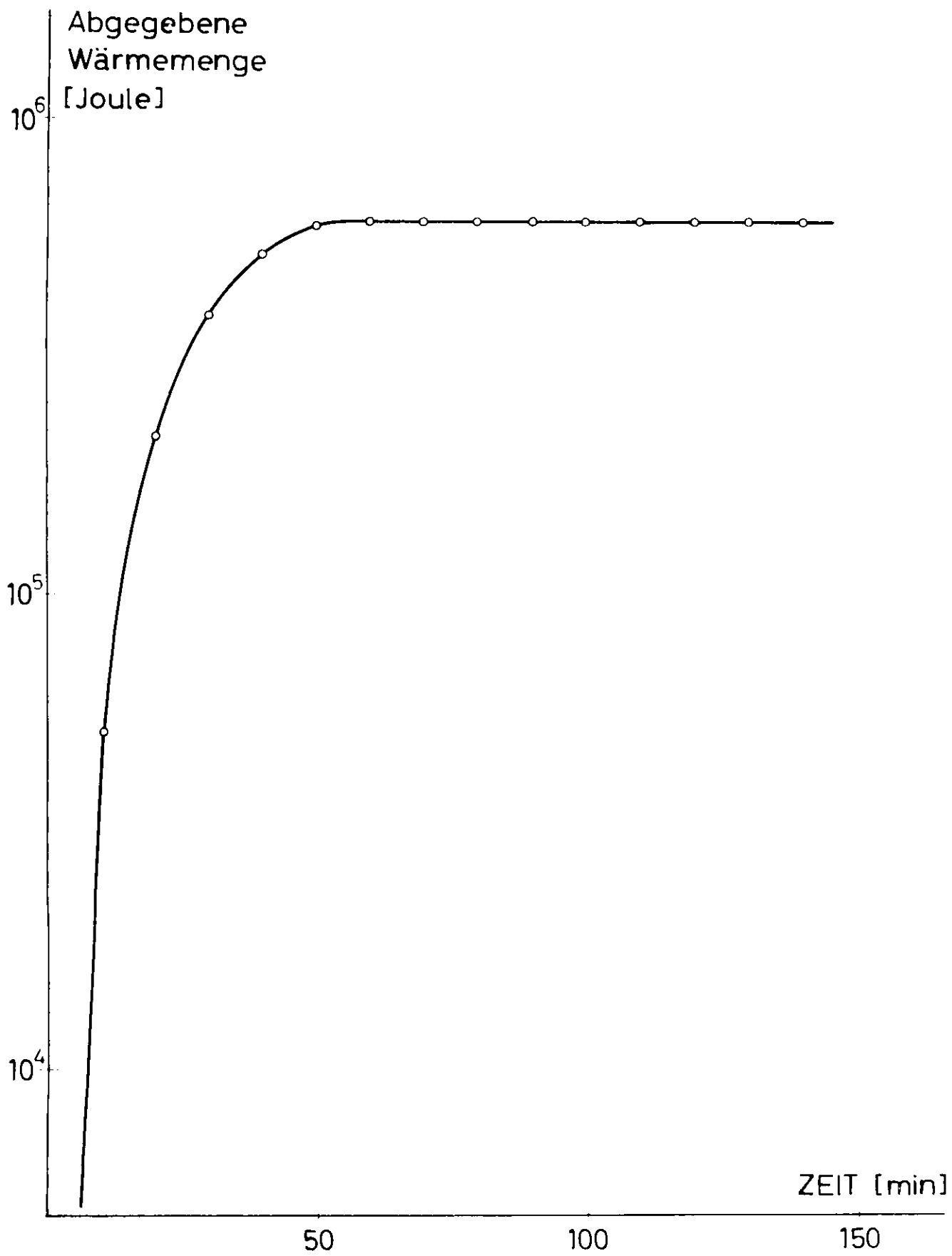


Abb. 16

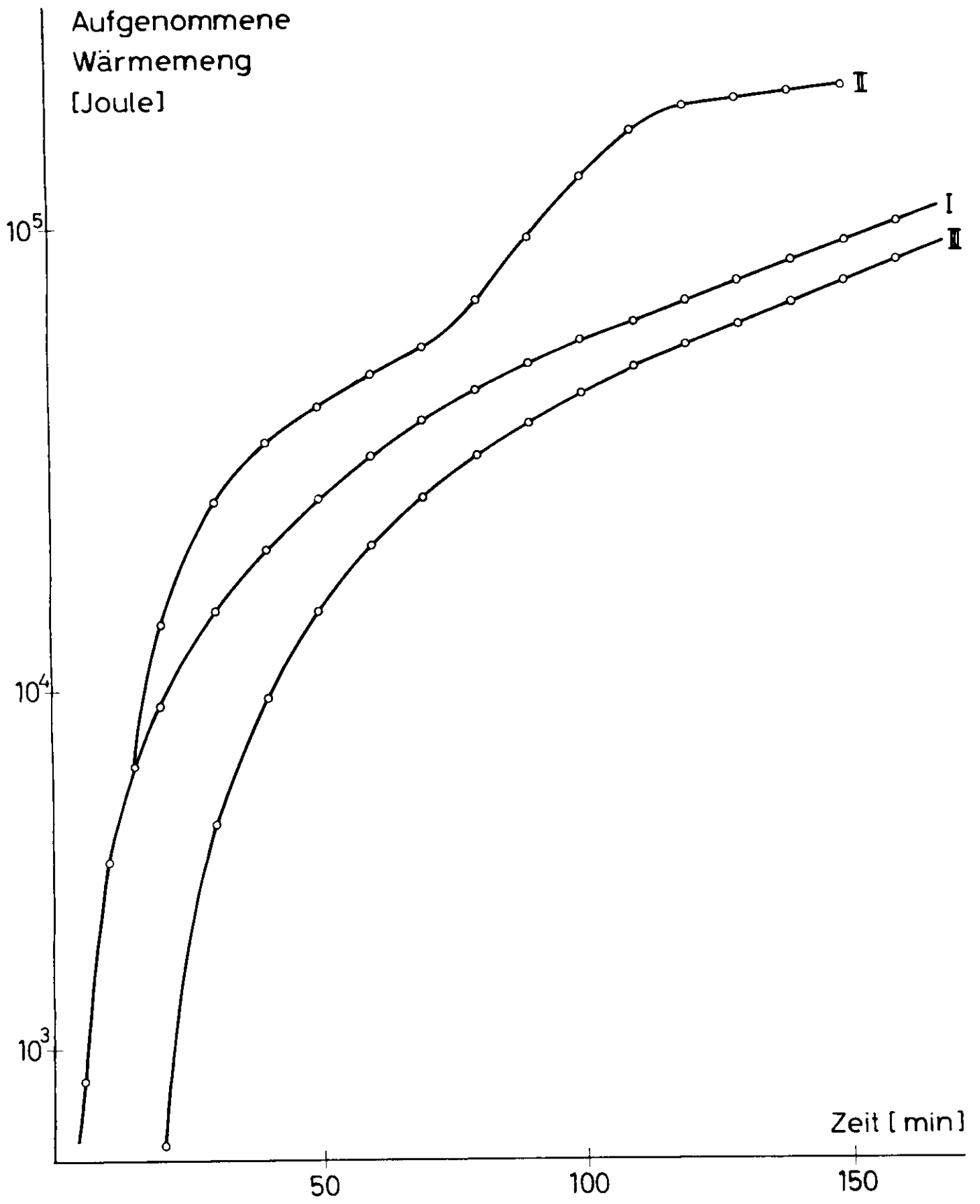


Abb. 17

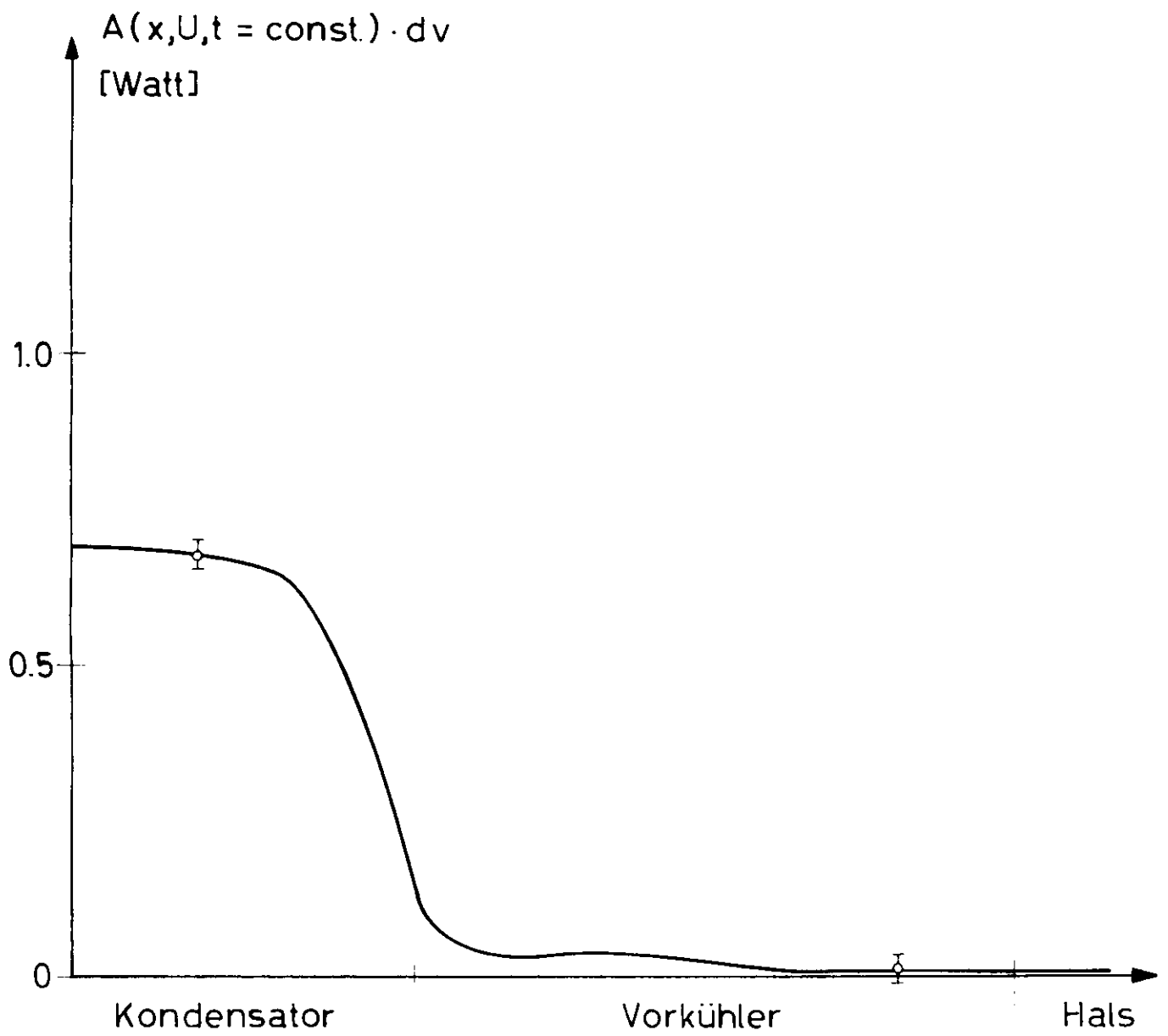


Abb. 18





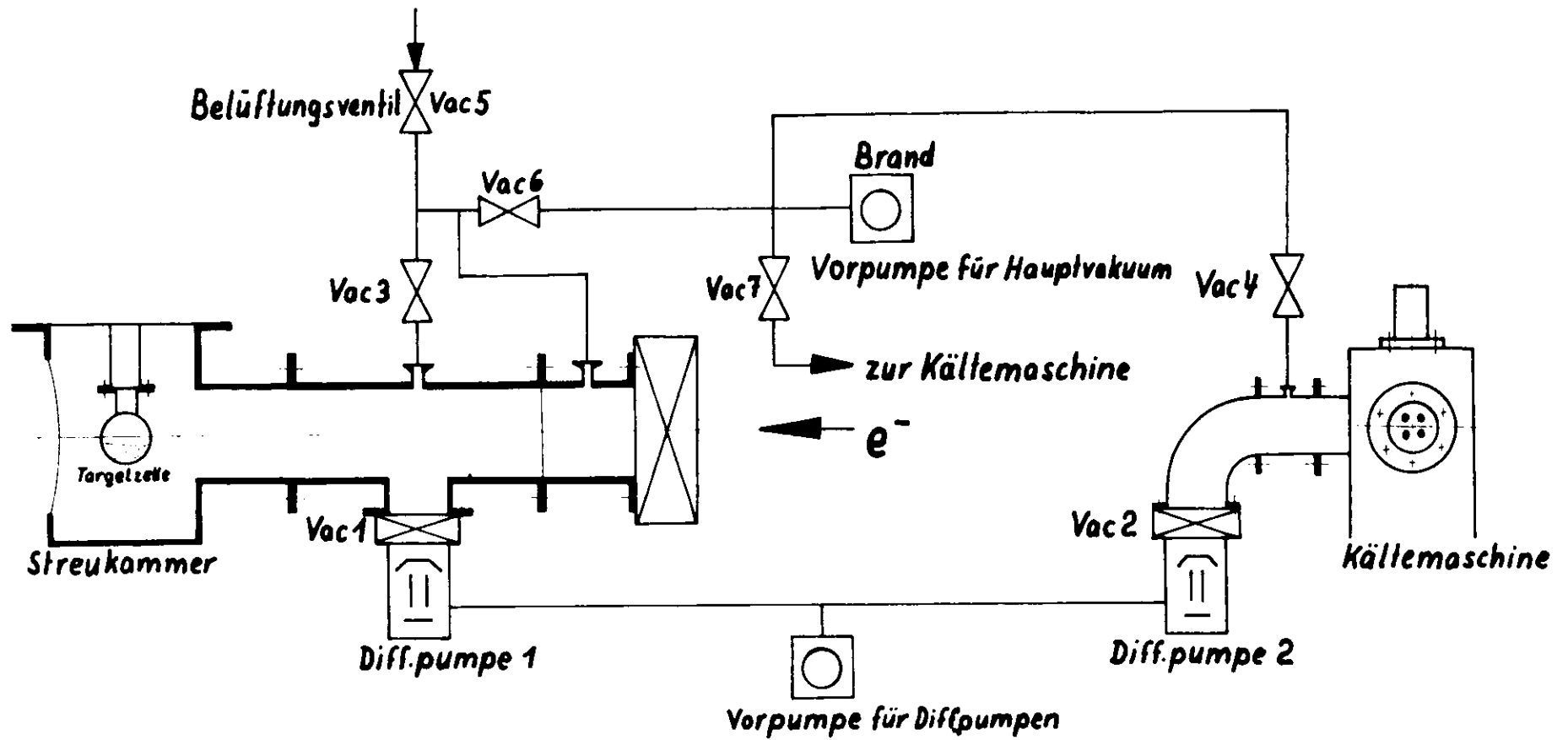


Abb.20

## Anhang

I. Wartung und Betrieb der Kältemaschine

## a) Allgemeine Regeln

Als Arbeitsgas und als Füllgas der Transferleitung darf nur reinstes Helium verwendet werden .

Vor dem Füllen mit Helium sind alle Leitungen gut auszupumpen und mehrmals (2-3-mal) zu spülen.

Vor jedem Einschalten der Kältemaschine ist der Maschinendruck (23 atü) und der Transferleitungsdruck (20 atü) zu überprüfen und eventuell He nachzufüllen.

Vor dem Einschalten Ölstand prüfen und eventuell Öl nachfüllen.

Die Gegenheizung darf nur bei laufender Maschine betrieben werden, da sonst die Regeneratoren verderben.

Alle 1000 Stunden Kühlwasserfilter kontrollieren.

Alle 2000 Stunden Arbeitsgas auswechseln und Startzylinder abblasen.

Alle 4000 Stunden werden größere Wartungsarbeiten fällig, die von der Firma Philips auszuführen sind.

Die Lieferzeiten für Ersatzteile sind erfahrungsgemäß sehr lang.

Deshalb sollten auf Lager gehalten werden:

- 1 Satz Dichtungen
- 1 Startventil
- 1 Satz Regeneratoren

## b) Einschalten der Kältemaschine

1. Vakuum im Kühlkopf und in der Streukammer prüfen (besser als  $10^{-4}$  Torr)
2. Targetzelle und Wärmeaustauscher mit  $H_2$ ,  $D_2$  oder He füllen oder evakuieren. Niemals mit Luftfüllung abkühlen.
3. Kühlwasser an der Kältemaschine einschalten.
4. Puffervolumina für Maschine und Transferleitung öffnen.
5. Frequenzumformer einschalten, und wenn alle drei Phasenanzeigelampen leuchten, Ventilator einschalten. Dabei ist darauf zu achten, daß alle drei Phasen gleichmäßig belastet werden.
6. Kältemaschine starten. Dabei muß der Maschinendruck von etwa 23 auf etwa 30 atü ansteigen.

Die Kühlleistung der Maschine kann mit Hilfe des Wasserstoffthermometers, welches mit dem Kühlkopf verbunden ist, kontrolliert werden.

Wenn die Anlage nicht kühlt und die Rohrleitung zum Startzylinder heiß wird (über  $60^{\circ}$ ), ist das Startventil nicht in Ordnung, und die Kältemaschine muß abgeschaltet werden.

7. Normalerweise ist das Target nach etwa einer Stunde auf Wasserstoff - temperatur.

#### c) Abschalten der Kältemaschine

1. Antriebsmotor ausschalten und am Schwungrad abbremsen, um ein Rückwärtslaufen der Maschine zu verhindern.
2. Ventilator aus, Frequenzumformer aus.
3. Nach etwa einer Stunde Kühlwasser abstellen.
4. Nach etwa einem Tag Puffervolumina schließen und bei einer längeren Unterbrechung Vakuumpumpen ausschalten.

## II. Das Vakuumsystem des Wasserstofftargets (Abb. 20)

### a) Allgemeine Regeln

Das Vakuumsystem des Wasserstofftargets setzt sich aus drei Systemen zusammen:

- Kühlkopf der Kältemaschine und Transferleitung (Hochvakuum)
- Streukammer (Hochvakuum)
- Strahlrohr zum Synchrotron (Vorvakuum)

Der Kühlkopf und die Streukammer hängen an je einer Diffusionspumpe, die an eine gemeinsame Vorpumpe angeschlossen sind.

Das Hochvakuum der Streukammer und das Vorvakuum des Strahlrohres sind durch eine H-Folie von 125  $\mu$  getrennt. Es ist darauf zu achten, daß die Räume vor und hinter der Folie stets auf gleichem Druckniveau bleiben. Es gibt eine Vorpumpe (Brandtpumpe), die wahlweise mit den verschiedenen Teilen des Vakuumsystems verbunden werden kann.

### b) Auspumpen des Vakuumsystems

#### 1. Einschalten der Diffusionspumpen.

- Plattenventile Vac1 und Vac2 schließen
- Vorpumpe ein (Vorvakuum besser als  $10^{-1}$  Torr)

Kühlwasser für Diffusionspumpen ein.

Diffusionspumpen ein.

2. Vakuumsysteme mit der Vorpumpe evakuieren.

Kühlkopf über Vac4 auspumpen.

Streukammer über Vac3 und Vac6 evakuieren; Vac6 dabei nur langsam öffnen, damit die Streukammerfenster nicht plötzlich belastet werden.

3. Bei einem Druck von weniger als  $10^{-1}$  Torr können die Diffusionspumpen angeschlossen werden.

Kühlkopf: Vac4 schließen und Plattenventil Vac2 öffnen.

Streukammer: Vac3 schließen und Plattenventil Vac 1 öffnen. Die Brandtpumpe muß weiter laufen und Vac6 geöffnet bleiben, damit das Strahlrohr weiterhin ausgepumpt wird.

c) Belüften der Vakuumsysteme

Da die Plattenventile über den Diffusionspumpen Vac1 und Vac2 nur in einer Richtung dichten, ist zu vermeiden, daß das Vorvakuum der Diffusionspumpen zusammenbricht, während die Rezipienten noch unter Vakuum stehen. Die Streukammer darf nur belüftet werden, wenn die Targetzelle unter Atmosphärendruck steht, da sie andernfalls zerdrückt wird.

Kühlkopf: Vac1 schließen und belüften

Streukammer: Vac1 schließen

Vac3 öffnen und Brandtpumpe abstellen oder Vac6 schließen  
Streukammer und Strahlrohr langsam über das Dosierventil Vac5 belüften. Wenn der Kryostat noch kalt ist, mit trockenem verdampfenden Stickstoff begasen. Nach dem Belüften der Streukammer muß zum vollständigen Druckausgleich ein NW20 Blindflansch am Plattenventil der Diffusionspumpe gelöst werden, da sonst durch das Spülgas der Sicherheitsleitung ein Überdruck in der Streukammer erzeugt wird.

III. Betrieb des Wasserstofftargets.

Sämtliche Ventilangaben beziehen sich auf die Abb. 7

a) Allgemeine Regeln

Bevor die Kältemaschine in Betrieb genommen wird, muß man sich von der

Vakuumdichtigkeit des Systems überzeugen. Dazu wird bei ca.  $10^{-4}$  Torr Streukammerdruck die Targetzelle evakuiert und anschließend wieder belüftet. Dabei darf sich der Streukammerdruck nicht ändern. Eine Verschlechterung des Vakuums deutet auf ein Leck hin, welches erfahrungsgemäß bei kalter Zelle größer wird.

Um ein Einfrieren des Targets zu vermeiden, muß die Vakuumdichtigkeit des Wasserstoffsystems überprüft werden. Dazu wird die Zelle evakuiert und durch Schließen der Ventile V5 und V12 das Puffervolumen abgetrennt. Nach dem Schließen der Ventile V11 und V10 zur Vorpumpe beobachtet man etwa 15 Min lang den Zellendruck, der in dieser Zeit nicht merklich ansteigen darf. Das Abgasventil V9 bleibt grundsätzlich geschlossen und darf nur in Notfällen geöffnet werden, wenn der Zellendruck aufgrund eines Fehlers über Atmosphärendruck steigt.

Aus Sicherheitsgründen wird grundsätzlich aus dem Puffervolumen einkondensiert, niemals aber eine Gasflasche direkt mit der Targetzelle verbunden.

#### b) Warmstart

1. Das Wasserstoffsystem wird mitsamt dem Puffervolumen auf ca. 0.5 Torr ausgepumpt. (Thermotron Meßstelle C). Dabei sind sämtliche Ventile geöffnet (bis auf V9). Wichtig ist, daß V13 offen ist, damit auch die Schlauchleitungen bis zu den Gasflaschen evakuiert werden. Nach Erreichen von 0.5 Torr V10 und V11 schließen und aus Sicherheitsgründen die Vorpumpe im Füllstand abschalten, um bei Bedienungsfehlern das Target nicht zu gefährden.
2. Das System kann jetzt mit  $H_2$  oder  $D_2$  bis zu einem Druck von 1.05 atm gefüllt werden. Nach dem Füllen mit  $H_2$  nur das Flaschenreduzierventil schließen, nicht aber V13. Bei  $D_2$  kann auch V13 geschlossen werden, da in diesem Falle kein Nachkondensieren erforderlich ist.
3. Kältemaschine starten wie unter I beschrieben.
4. Nach etwa einer Stunde kondensiert der erste Wasserstoff ein. Die Menge reicht jedoch noch nicht aus, um die Zelle zu füllen, und es muß nachkondensiert werden.

Zur Füllung der Zelle werden insgesamt 0.75 atm Wasserstoff (Deuterium) benötigt.

Bei einem Zellendruck von 0.6 atm Kryostat durch Schließen von V1, V2, V3, V4

abtrennen. (Der Zellendruck fällt danach weiter). In das Puffervolumen werden noch einmal 0.3 atm  $H_2$  gefüllt und anschließend auch V13 aus Sicherheitsgründen geschlossen.

H3 schließen und V3 öffnen. Jetzt kann durch langsames öffnen von H3 ein Druckausgleich zwischen dem Puffervolumen und der Zelle hergestellt werden. Nach dem Druckausgleich H3 vollständig öffnen und V1, V2, V4 öffnen. Nach etwa 20 Min. ist der Zellendruck auf ca. 0.6 atm gefallen, die Zelle aber noch nicht voll. Nach Einschalten der Gegenheizung auf ca. 35 Watt füllt sich die Zelle.

Während der nächsten Stunde ist die Gegenheizung so nachzuregeln, daß der Zellendruck zwischen 0.7 und 0.6 atm stabil bleibt.

5. Wird Deuterium einkondensiert, so ist ein Nachkondensieren nicht nötig, da der Arbeitsdruck zwischen 0.2 und 0.3 atm liegt. Auch hier ist die Zelle zunächst nach Erreichen des Arbeitsdrucks nicht voll und füllt sich erst nach dem Einschalten der Gegenheizung auf ca. 40 Watt.

c) Wechsel zwischen Wasserstoff und Deuterium.

1. Gasflaschen wechseln. Dabei ist darauf zu achten, daß V13 geschlossen ist und keine Luft in den Kryostaten eindringt.

V2 schließen, damit der Wasserstoff in den Kryostaten zurückfließt.

V4 schließen,

Pumpe im Füllstand einschalten.

Das Pumpenventil H10 ganz langsam öffnen bis der Zellendruck anfängt zu fallen.

V3 kurzzeitig schließen, damit der flüssige Wasserstoff durch die Leitung A abgepumpt werden kann. Sobald der Zellendruck steigt, V3 wieder öffnen.

V3 wieder schließen und den Zyklus so lange wiederholen, bis auch bei geschlossenem Ventil V3 der Zellendruck fällt.

H10 schließen und die Ventile V2, V3, V4 öffnen, damit der restliche Wasserstoff in die Zelle zurückfließen kann. Dieser Rest wird langsam über das Ventil H10 abgepumpt, wobei darauf zu achten ist, daß sich in der Zelle kein Eis bildet.

H10 schließen.

Gegenheizung aus.

V1, V2, V3, V4 schließen. Damit ist der Kryostat vom übrigen System abgetrennt.

Jetzt kann V13 geöffnet werden, ohne daß Luft in den Kryostaten eindringt. Durch Öffnen von V10 und V11 werden die Leitungen bis zu den Gasflaschen und das Puffervolumen bis auf ca. 1 Torr ausgepumpt.

Erst jetzt wird durch Öffnen von V1, V2, V3, V4 das Restgas aus dem Kryostaten abgepumpt.

Pumpen bis 0.5 Torr (Thermotron Meßstelle C)

## 2. Einkondensieren

V10 und V11 schließen

Aus Sicherheitsgründen Pumpe im Füllstand aus.

Durch Schließen: Von V1, V2, V3, V4 den Kryostaten vom Puffervolumen abtrennen.

Puffervolumen füllen

1.45 atm bei Wasserstoff

1.05 atm bei Deuterium

V13 schließen. (Aus Sicherheitsgründen)

H3 schließen und V3 öffnen.

H3 langsam öffnen und das Gas aus dem Puffervolumen in den Kryostaten strömen lassen.

Bei einem Druck von ca. 0.8 atm H3 schließen.

Wenn der Zellendruck auf 0.6 atm abgefallen ist, H3 wieder öffnen.

Diesen Zyklus so lange wiederholen, bis der Druckausgleich zwischen dem Puffer und der Zelle hergestellt ist.

V1, V2, V4 öffnen.

Wenn der gewünschte Arbeitsdruck erreicht ist, Gegenheizung einschalten.

Dann füllt sich auch die Zelle vollständig.

Bei der neuen Version des Kryostaten werden alle Operationen mit V4 und H4 überflüssig.

## IV. Betrieb ohne elektromagnetische Ventile

Da das Ventil V13 stromlos geschlossen ist, muß dieses Ventil mit einer Schlauchleitung überbrückt werden.

Beim Wechsel der Gasflaschen muß ein Handventil in der Leitung zum Puffervolumen geschlossen werden.

Alle anderen Operationen verlaufen analog zu den unter III. beschriebenen.



## V. Zellenwechsel bei kaltem Target

Gegenheizung aus

Kältemaschine abstellen.

Ventilator und Frequenzumformer aus.

Target leerpumpen wie unter III. angegeben.

Target mit He füllen.

Target mit trockenem (verdampfendem) Stickstoff füllen bis ca. 700 Torr

Gegenheizung am Target auf ca. 75 - 100 Watt einstellen. Dabei ist darauf

zu achten, daß die Superisolationsfolie nicht verschmort. Nach ca. einer

Stunde kann die Streukammer geöffnet werden. Dabei vereist zunächst der

untere Teil des Kryostaten. Erst wenn der Kryostat abgetaut ist, kann die Zelle

gewechselt werden. Zur schnelleren Erwärmung des Kryostaten kann noch mit

einer Infrarotlampe zusätzlich geheizt werden.

Beim Wiederpumpen empfiehlt es sich, etwa 15 Min mit Gasballast zu

pumpen, um für Wasserdampf eine höhere Pumpleistung zu erreichen.

