



St
Stw

KERNFORSCHUNGSANLAGE JÜLICH GmbH

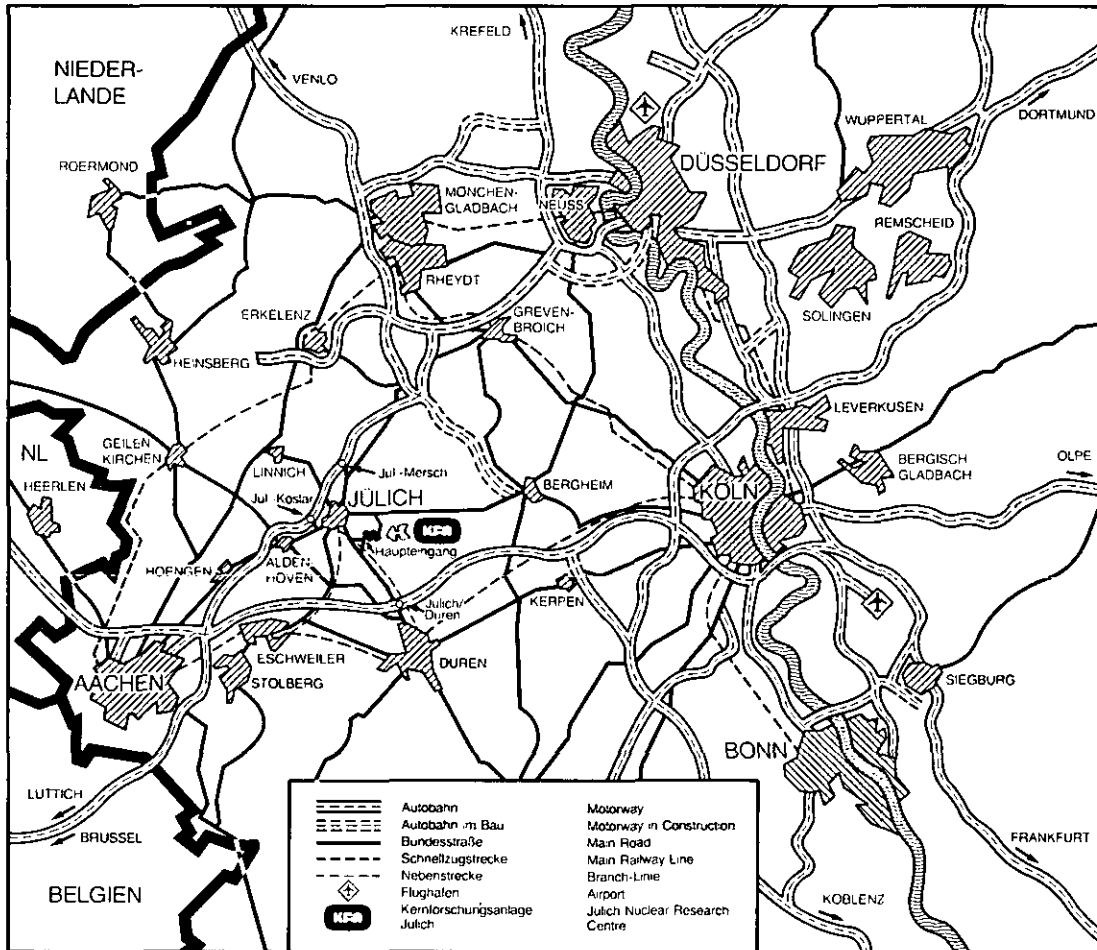
Institut für Nukleare Sicherheitsforschung

Gasaustausch zwischen einem Helium enthaltenden Behälter und der Umgebung über ein nach unten abgehendes Rohr und dessen Relevanz für den HTR-Modul

von

G. Breitbach
H.P. David
M. Nickel
J. Wolters

Jül - Spez - 273
September 1984
ISSN 0343 - 7639



Als Manuskript gedruckt

Spezielle Berichte der Kernforschungsanlage Jülich – Nr. 273

Institut für Nukleare Sicherheitsforschung Jül-Spez-273

Zu beziehen durch: ZENTRALBIBLIOTHEK der Kernforschungsanlage Jülich GmbH
 Postfach 1913 · D-5170 Jülich (Bundesrepublik Deutschland)
 Telefon: 02461/610 · Telex: 833556-0 kf d

**Gasaustausch zwischen
einem Helium enthaltenden Behälter
und der Umgebung über
ein nach unten abgehendes Rohr und
dessen Relevanz für den HTR-Modul**

von

G. Breitbach
H.P. David
M. Nickel
J. Wolters

KURZFASSUNG

Nach dem Abriß des Kugelbeschickungsrohres ($\varnothing = 65$ mm) beim HTR-Modul-Reaktor kommt es zu einer schnellen Druckentlastung und im Anschluß daran zu einem langfristigen Gasaustausch zwischen Primärkreislauf und Reaktorschutzgebäude.

Es wurden Versuche durchgeführt, die sich mit dem Problem des Gasaustausches über eine vertikal angeordnete, mit einem Behälter verbundene Rohrleitung befassen. Weiterhin wurde ein Rechenmodell entwickelt, mit dem der Gasaustausch durch die Rohrleitung bestimmt werden kann, wobei die im Versuch festgestellten Einflüsse eingearbeitet worden sind. Ein Vergleich zwischen Versuch und Rechnung zeigt eine gute Übereinstimmung.

Die Übertragung der Ergebnisse auf den HTR-Modul zeigt, daß der Gasaustausch im Falle des Abrisses des Beschickungsrohres nur durch die Ausdehnung und Kontraktion des Primärkreisgases bestimmt wird. Daher ist der Lufteintrag in den Primärkreis sehr klein.

ABSTRACT

After a fracture of the fuel charge tube ($\varnothing = 65$ mm) of a HTR-Modul-Reactor a rapid depressurization of the primary circuit occurs and thereafter a long-range gas exchange between primary circuit and containment takes place.

Experiments related to the problem of gas exchange between a vessel and the environment via a vertically installed tube were carried out.

For the calculation of the gas exchange rates a computer code was developed, which takes into account all mechanisms influencing the exchange rate in the experiment. The calculated values were in good agreement with the experimental results.

The transformation of the results to a HTR-Modul shows that the gas exchange rate in the case of a charge tube fracture is only determined by gas expansion and contraction in the primary circuit. Therefore the amount of air entering the primary circuit is very small.

INHALTSVERZEICHNIS

Seite

1.	Einleitung und Problemstellung	1
2.	Experiment	2
2.1	Meßgrößen und Meßmethoden	2
2.1.1	Temperaturmessung	2
2.1.2	Messung des Luftanteils im Behälter	3
2.1.3	Messung der statischen Druckdifferenz zwischen der Gas- säule im Rohr und der Umgebung	4
2.2	Versuchsergebnisse	4
3.	Theoretisches Modell zur Beschreibung des Gasaustausches	5
3.1	Numerisches Lösungsverfahren	7
3.2	Der Diffusionskoeffizient $D_{\text{He-Lu}}$	8
4.	Vergleich von Theorie und Experiment	10
5.	Übertragung der Ergebnisse auf den Gasaustausch zwischen dem Primärkreis des Moduls und dem Reaktorschutzgebäude	12
6.	Schlußfolgerungen	14
7.	Literatur	16

1. EINLEITUNG UND PROBLEMSTELLUNG

Die KWU-Gruppe hat sich in den letzten Jahren mit heliumgekühlten Hochtemperaturreaktoren kleiner Leistung (sog. Modulen) beschäftigt, die von ihren Abmessungen her noch in Stahlbehältern untergebracht werden können.

Im Zusammenhang mit Druckentlastungsstörfällen beim Modul durch Abriß von primärkreisverbundenen Versorgungsleitungen wurde die Frage aufgeworfen, mit welchen Raten sich im Anschluß an die Druckentlastung das Primärkreishelium und die im Containment befindliche Luft austauschen.

Aus Abb. 1 ist zu entnehmen, wie sich der Gasaustausch über ein abgerissenes Kugelbeschickungsrohr (DN 65) abspielt. Um in das Innere des Primärkreises zu gelangen, muß die Luft im Rohr aufsteigen. In der vorliegenden Konfiguration wird der Helium-Luft-Austausch durch ein mit Diffusion gekoppeltes 'Atmen' des Primärkreises zustande kommen. Unter 'Atmen' ist hierbei das durch Temperaturänderungen innerhalb der Modulbehälter oder Druckänderungen außerhalb von ihnen bedingte Einsaugen oder Ausstoßen von Primärkreislaufgas zu verstehen.

In einem Experiment werden derartige Austauschvorgänge untersucht. Da im Experiment die Störfallbedingungen nicht simuliert werden können, sondern Versuche nur unter anderen Bedingungen durchführbar sind, ergibt sich die Notwendigkeit einer genauen theoretischen Analyse der auftretenden Phänomene und Einflußfaktoren.

Neben den experimentellen Aktivitäten sind somit theoretische Untersuchungen erforderlich, die in der Entwicklung eines Rechenmodells münden, mit dem ganz allgemein der Gasaustausch über eine Rohrleitung in der in Abb. 1 gezeigten Konfiguration berechnet werden kann.

Unter der Voraussetzung guter Übereinstimmung zwischen Modellrechnungen und experimentellen Ergebnissen wird mit dem Rechenmodell die Störfallsituation analysiert.

2. EXPERIMENT

Für die Versuche stand ein etwa 4 m hoher Behälter mit einem Durchmesser von 1 m zur Verfügung (siehe Abb. 2,3). Am Behälter war oben über einem Rohrbogen ein senkrecht nach unten abgehendes Rohr (DN 65) angebracht. Wenn auch das Rohr hier außerhalb des Behälters liegt, so ist die Situation im Hinblick auf den Gasaustausch bei dieser Konfiguration ähnlich wie in Abb. 1.

Der Behälter samt angeflanschem Rohr konnte evakuiert und im Anschluß daran mit Helium gefüllt werden. Wenn der Fülldruck dem Umgebungsdruck entsprach, wurde das Rohr unten geöffnet, so daß ein Gasaustausch zwischen dem im Behälter und Rohr anstehenden Helium und der Umgebungsluft erfolgen konnte.

2.1 Meßgrößen und Meßmethoden

Die Meßwerterfassung über die Versuchszeit von mehreren Wochen wurde mit einer Datenerfassungsanlage automatisch bewerkstelligt. Halbstündlich wurde gemessen und die Werte sodann abgespeichert.

Im einzelnen wurden im Versuchsverlauf - worauf im folgenden näher eingegangen wird - folgende Größen aufgezeichnet:

- die Temperatur der Behälterwandung,
- der Gewichtswert einer im Behälter deponierten Waage zur Luftanteilbestimmung,
- der Verlauf der statischen Druckdifferenz zwischen Rohr und Umgebung, der ein Maß für die mittlere Luft- bzw. Heliumkonzentration im angeflanschten Rohr ist sowie
- der Verlauf der Sauerstoffkonzentration am tiefsten Punkt der Behälteratmosphäre.

Der ebenfalls für eine Analyse des Versuchs nötige Luftdruckverlauf über die Versuchsdauer wurde beim örtlichen Wetterdienst beschafft.

2.1.1 Temperaturmessung

Zur Messung des Temperaturgangs des Behälters war ein Ni-CrNi-Thermoelement an die äußere Behälterwandung angeklebt. Streng

genommen benötigt man für eine Versuchsanalyse direkt den Temperaturverlauf des Gases innerhalb des Behälters. Es wurde hier davon ausgegangen, daß wegen der langsamen Temperaturänderungen Wandung und Behälteratmosphäre im Temperaturgleichgewicht sind.

2.1.2 Messung des Luftanteils im Behälter

Zur Ermittlung des Verlaufs des Luftanteils im Behälter wurden 2 voneinander unabhängige Meßmethoden eingesetzt.

Die eine Methode nutzt das 'Archimedische Prinzip' aus: Das Gewicht eines Körpers ist wegen der Auftriebskräfte in unterschiedlich schweren Fluiden verschieden. Wiegt man mit einer Präzisionswaage einen Körper in Luft und sodann in einer Helium-Luft-Mischung, so resultiert ein Gewichtsunterschied ΔG von $V \cdot (\gamma_{\text{Luft}} - \gamma_{\text{Gemisch}})$ wenn man mit V [m^3] das Körpervolumen und mit γ [N/m^3] die Wichte des Gases bzw. Gasgemisches bezeichnet. Somit läßt sich durch Wägung in Luft und im Gemisch über ΔG der Helium- bzw. Luftanteil bestimmen.

Um das Prinzip für den Versuch nutzbar zu machen, wurde eine Präzisionswaage im Behälter untergebracht, auf der eine schlanke aus Plexiglasrohren gefertigte Säule stand. Aus deren Gewichtsänderung während des Versuchs läßt sich unter der Voraussetzung einer stets gut gemischten Behälteratmosphäre auf den Luftanteil schließen:

$$x_i = \frac{\frac{R_{\text{uni}} \cdot T_i}{P_i} \cdot \left(\frac{A_0 - A_i}{g \cdot V} + \frac{P_0}{R_0 \cdot T_0} \right) - M_{\text{He}}}{M_{\text{Lu}} - M_{\text{He}}}$$

Dabei bedeuten:

- x_i = Volumenanteil der Luft zum Zeitpunkt T_i [-]
- V = Säulenvolumen [m^3]
- g = Erdbeschleunigung = $9,81$ [$\frac{\text{m}}{\text{sec}^2}$]
- R_{uni} = $8314,3$ [$\text{J/kmol} \cdot \text{K}$] universelle Gaskonstante
- M_{He} = Molekulargewicht des He = 4 [$\frac{\text{kg}}{\text{kmol}}$]
- M_{Lu} = " " der Lu = 29 [$\frac{\text{kg}}{\text{kmol}}$]
- R_0 = $R_{\text{uni}}/M_{\text{HE}}$ [$\text{J/kg} \cdot \text{K}$]
- P_i, P_0 = Gasdruck zum Zeitpunkt t_i bzw. t_0 [N/m^2]
- T_i, T_0 = Gastemperatur zum Zeitpunkt T_i bzw. t_0 [K]

A_0, A_1 = Gewichtsanzeige der Waage [N]

Im übrigen sollte hier noch erwähnt werden, daß diese Methode nicht nur bei vollständig durchmischten Atmosphären einsetzbar ist. Bei einer geschichteten Behälteratmosphäre, soweit die Säule die Schichtung durchmißt, erhält man bei einer Wägung den über die Schichten gemittelten Luftanteil.

Neben der Auftriebsmessung bestand die Möglichkeit über einen Sauerstoffsensordirekt den O_2 -Gehalt im unteren Bereich des Behälters zu messen. Dazu wurde unten am Behälter (s. Abb. 2) Gas abgepumpt, am Sensor vorbeigeführt und im mittleren Behälterteil wieder der Behälteratmosphäre zugeführt.

2.1.3 Messung der statischen Druckdifferenz zwischen der Gassäule im Rohr und der Umgebung

Im oberen Bereich des Rohres, am Rohrkrümmer, befand sich ein Druckaufnehmer, der es gestattete, Differenzdrücke im Bereich 0-700 μ bar zu messen. Mit diesem empfindlichen Gerät wurde die statische Druckdifferenz zwischen dem Rohrrinnern und der Umgebungsluft auf gleicher Höhe gemessen. Aus dieser Druckdifferenz resultiert die mittlere Konzentration von Luft bzw. Helium im Rohr. Ist beispielsweise das Rohr mit reinem Helium gefüllt, so ist der Differenzdruck Rohr-Umgebung $(\rho_{Lu} - \rho_{He}) \cdot g \cdot H$, wobei mit ρ die Dichten, und mit H die Höhe des Druckaufnehmers über der unteren Rohröffnung bezeichnet ist. Umgekehrt, wenn sich innerhalb des Rohres Luft befindet, so ergibt sich die statische Druckdifferenz zu Null. Im allgemeinen Fall beträgt sie

$$\rho_{Lu} \cdot g \cdot H - \int_0^H \rho_{Gemisch}(x) \cdot g \cdot dx.$$

Das Verfolgen dieser Druckdifferenz über die Versuchsdauer gibt einen guten Überblick über die zeitlich sich ändernden Gaskonzentrationsverhältnisse innerhalb des Rohres.

2.2. Versuchsergebnisse

Die Abbildungen 4-7 zeigen die Meßdaten des Experimentes, das am 3. August 1983, 9,45 Uhr, gestartet wurde.

Abb. 4 zeigt den durch die Umgebungsbedingungen beeinflussten Temperaturverlauf des Behälters. Der Verlauf wird im 24 h-Rhythmus durch Tag-Nacht-Schwankungen sowie durch Wetteränderungen und temperaturbeeinflussende Vorgänge in der Experimentierhalle bestimmt. Entsprechend zeigt die Abb. 5 den Verlauf des Luftdrucks während des Versuchs. Abb. 6 zeigt die statische Druckdifferenz zwischen der Gassäule im Rohr und der Umgebungsluft über die Versuchszeit. Vergleicht man Abb. 6 und Abb. 4, so erkennt man eine gewisse Ähnlichkeit in den Kurvenverläufen, was auch leicht einsehbar ist.

In Phasen, wo die Temperatur der Behälteratmosphäre ansteigt, dehnt sie sich aus und schiebt somit Helium in das angeflanschte Rohr. Die Druckdifferenz wächst dann an. Umgekehrt, in Abkühlphasen zieht sich das im Behälter befindliche Helium zusammen, wodurch Luft in das Rohr hineindrückt und die Druckdifferenz vermindert.

Bild 7 zeigt die Gewichtsänderung der Meßsäule, die durch ansteigenden Auftrieb zustande kommt. Der Startwert von $-11,1$ [p] entspricht der aus reinem Helium bestehenden Behälteratmosphäre. Für die Berechnung der Mischungsverhältnisse ist die Kenntnis von absoluten Gewichten nicht erforderlich.

Die Kurve 1 der Abb. 8 zeigt den nach der in Abschnitt 2.1.2 angegebenen Formel errechneten Luftanteil im Behälter. Innerhalb von 540 h steigt das Luftinventar auf etwa 20 Vol%. Die zweite Kurve beschreibt den über die Sauerstoffmessung bestimmten Luftanteil. Die Sauerstoffmessung wurde erst in Betrieb genommen, als das Experiment bereits 120 h lief. Die Kurve liegt etwas unter den mit der Auftriebsmessung bestimmten Werten. Im großen und ganzen muß man jedoch die Übereinstimmung der beiden Meßverfahren als gut bezeichnen.

3. THEORETISCHES MODELL ZUR BESCHREIBUNG DES GASAUUSTAUSCHES

Änderungen der Konzentrationsverhältnisse entlang des Rohres und innerhalb des Behälters resultieren aus Konvektions- und Diffusionsvorgängen. Längs des Rohres gilt für die örtlich und zeitlich variierende Luftkonzentration die Differentialgleichung /1/

$$\frac{\partial c_{Lu}}{\partial t} = D_{He-Lu} \cdot \frac{\partial^2 c_{Lu}}{\partial x^2} - v \cdot \frac{\partial c_{Lu}}{\partial x} \quad (3.1)$$

c_{Lu} bezeichnet hierbei die Luftkonzentration in $[\text{kmol}/\text{m}^3]$; D_{He-Lu} $[\text{m}^2/\text{sec}]$ ist der Diffusionskoeffizient des Helium-Luft-Gemisches, wobei Luft hier als einkomponentiges ideales Gas mit Molgewicht 28,97 kg/kmol aufgefaßt wird.

Mit v ist die Gasgeschwindigkeit im Rohr bezeichnet, die durch Temperaturänderungen innerhalb des Behälters sowie durch Luftdruckschwankungen in der Umgebung bewirkt wird.

Unter Benutzung der Zustandsgleichung für ideale Gase leitet man für die Geschwindigkeit v im Rohr ab:

$$v = - \frac{V_B}{F_R \cdot T(t)} \cdot \frac{dT(t)}{dt} + \frac{V_B}{F_R \cdot P(t)} \cdot \frac{dP(t)}{dt} \quad (3.2)$$

mit:

- V_B = Behältervolumen $[\text{m}^3]$
- F_R = Rohrquerschnittsfläche $[\text{m}^2]$
- $T(t)$ = Temperaturgang der Behälteratmosphäre $[\text{K}]$
- $P(t)$ = Umgebungsdruckverlauf $[\text{Pa}]$

Die Randbedingungen, unter denen Gl. (3.1) zu lösen ist, sind im folgenden angegeben.

Die Luftkonzentration der Umgebung (was der Position $x=0$ entspricht) hängt ab vom Luftdruck $P(t)$ und der Umgebungstemperatur $T_{um}(t)$, die im allgemeinen von der Temperatur der Behälteratmosphäre verschieden sein kann.

$$c_{Lu}(0, t) = \frac{P(t)}{R \cdot T_{um}(t)} \quad R = 8314,3 \left[\frac{\text{J}}{\text{kmol} \cdot \text{K}} \right] \quad (3.3)$$

Unter der Annahme einer stets vollständig durchmischten Behälteratmosphäre wird die Luftkonzentration innerhalb des Behälters durch die Integration des Luftstromes über die Zeit am Behältereintritt (Position $x = H$) bestimmt.

$$c_{Lu}(H, t) = \frac{F_R}{V_B} \cdot \int_0^t \left(-D_{He-Lu} \cdot \frac{\partial c_{Lu}(H, \tau)}{\partial x} + v \cdot c_{Lu}(H, \tau) \right) \cdot d\tau \quad (3.4)$$

Geht man von einer inhomogenen Gaszusammensetzung innerhalb des Behälters aus und setzt man beispielsweise voraus, daß im oberen Behälterplenium stets reines Helium ansteht (zumindest in der Anfangsphase), so wäre anstelle von (3.4) als Randbedingung zu wählen:

$$C_{Lu}(H, T) = 0 \quad (3.5)$$

Im übrigen sei noch bemerkt, daß zur Berechnung der mittleren Luftkonzentration die Gleichung (3.4) heranzuziehen ist. Nur unter der Bedingung homogener Mischungsverhältnisse fungiert (3.4) auch zusätzlich als Randbedingung für die Differentialgleichung (3.1).

3.1 Numerisches Lösungsverfahren

Die Lösung der Gleichung (3.1) für gegebene Rand- und Umgebungsbedingungen kann am einfachsten mit einem expliziten numerischen Verfahren bewerkstelligt werden, wobei der Wahl des Zeitinkrements Δt aus Gründen der Stabilität der Lösung besondere Aufmerksamkeit zu widmen ist /2/. Je nach Vorzeichen der Geschwindigkeit errechnet man über die folgenden Gleichungen die Konzentrationen der Zeitebene $k+1$ aus den Werten der Zeitebene k , wobei das Werteschema der Luftkonzentrationen mit C_i^k bezeichnet ist.

$$C_i^{k+1} = C_i^k + \Delta t^k \left\{ D_{He-Lu} \cdot \frac{C_{i-1}^k + C_{i+1}^k - 2C_i^k}{\Delta x^2} + |v^k| \cdot \frac{C_{i-1}^k - C_i^k}{\Delta x} \right\} \quad (3,6a)$$

im Falle $v^k > 0$

$$C_i^{k+1} = C_i^k + \Delta t^k \left\{ D_{He-Lu} \cdot \frac{C_{i-1}^k + C_{i+1}^k - 2C_i^k}{\Delta x^2} + |v^k| \cdot \frac{C_{i+1}^k - C_i^k}{\Delta x} \right\} \quad (3,6b)$$

im Falle $v^k < 0$

Die räumlichen Stützpunkte x_i sind hierbei äquidistant mit Abstand Δx gewählt. Bezeichnet man mit C_N^k die Luftkonzentration im Behälter bei vollständiger Durchmischung, so erhält man aus der Gleichung (3.4) folgende Bestimmungsgleichung für C_N^{k+1} als Randbedingung im numerischen Lösungsverfahren:

$$C_N^{k+1} = \frac{F_R}{V_B} \cdot \left\{ \sum_{\ell=1}^k (D_{\text{He-Lu}} \cdot \frac{C_{N-1}^{\ell} - C_N^{\ell}}{\Delta x} + v_{\ell} \cdot \{ \delta^{\ell} \cdot C_N^{\ell} + (1 - \delta^{\ell}) \cdot C_{N-1}^{\ell} \}) \cdot \Delta t_k \right\} \quad (3.7)$$

$$\delta^{\ell} = \begin{cases} 1 & \text{wenn } v_{\ell} < 0 \\ 0 & \text{" } v_{\ell} > 0 \end{cases}$$

Bei Verwendung der Randbedingung (3.5) ist $C_N^{k+1} = 0$ zu setzen, wobei die mittlere Luftkonzentration im Behälter in diesem Falle aus (3.7) zu errechnen ist, worauf bereits in Abschnitt 3 hingewiesen wurde.

Das Zeitinkrement Δt_k wird zu jedem Zeitpunkt t_k neu bestimmt. Wenn die Lösung des Differenzenschemas unter allen Umständen stabil bleiben soll, muß für Δt_k gelten /2/

$$\Delta t_k < \frac{\Delta x}{\frac{2 \cdot D_{\text{He-Lu}}}{\Delta x} + |v_k|} \quad (3.8)$$

3.2 Der Diffusionskoeffizient $D_{\text{He-Lu}}$

Der Diffusionskoeffizient $D_{\text{He-Lu}}$ wurde aus einer in /1/ angegebenen Formel berechnet, wobei Luft als einkomponentiges ideales Gas mit Molgewicht $M_{\text{Lu}} = 28,97 \text{ [kg]}$ angenommen wurde. Zusätzlich wurde ein Experiment zur Bestimmung von $D_{\text{He-Lu}}$ durchgeführt, auf das im Anschluß an die Berechnung eingegangen wird.

Mittels der erwähnten Formel kann für binäre Gasgemische bei niederen Drücken der Diffusionskoeffizient bei Kenntnis der kritischen Drücke, der kritischen Temperaturen und der Molgewichte der beiden Gase berechnet werden.

$$D_{\text{He-Lu}} \left[\frac{\text{cm}^2}{\text{sec}} \right] = \frac{a}{p} \cdot \left(\frac{T}{\sqrt{T_{\text{Lu}} \cdot T_{\text{He}}}} \right)^b \cdot (p_{\text{He}} \cdot p_{\text{Lu}})^{1/3} \cdot (T_{\text{He}} \cdot T_{\text{Lu}})^{5/12} \cdot \left(\frac{1}{M_{\text{He}}} + \frac{1}{M_{\text{Lu}}} \right) \quad (3.9)$$

Drücke sind in dieser Formel in atm, Temperaturen in Kelvin einzusetzen. Setzt man die folgenden Werte ein
 $a = 2,745 \cdot 10^{-4}$, $b = 1,823$, $p = 1 \text{ [atm]}$, $T = 300 \text{ [K]}$

	M $\left[\frac{\text{kg}}{\text{kmol}} \right]$	$T_c \text{ [K]}$	$P_c \text{ [atm]}$
He	4,003	5,26	2,26
Luft	28,97	132	36,4

so erhält man $D_{\text{He-Lu}}$ zu

$$D_{\text{He-Lu}} = 0,823 \text{ cm}^2/\text{sec.}$$

Zur experimentellen Ermittlung des Diffusionskoeffizienten wurde auf Rohrsegmente der bei den Gasaustauschversuchen verwendeten NW-65-Rohrleitung zurückgegriffen (s. Abb. 2). Das 4,50 m lange Rohrstück wurde in senkrechter Stellung aufgehängt, oben verschlossen und mit Helium gefüllt. Am oberen Ende war ein empfindlicher Druckaufnehmer montiert, mit dem die statische Druckdifferenz zwischen der Gassäule im Rohr und der Umgebung auf Höhe des oberen Rohrverschlusses gemessen werden konnte. Ist das Rohr mit Helium gefüllt, so herrscht oben im Rohr ein etwas höherer statischer Druck, der sich zu $(\rho_{\text{Lu}} - \rho_{\text{He}}) \cdot g \cdot L_{\text{Rohr}}$ errechnet.

Im Laufe der Zeit diffundiert von unten Luft in das Rohr und Helium in die Umgebung, so daß sich die statische Druckdifferenz vermindert. Die Druckdifferenz ist nun ein direktes Maß für die über die Rohrlänge gemittelte Luftkonzentration, was die Bestimmung des Diffusionskoeffizienten gestattet.

In Abb. 9 ist die normierte mittlere Dichte bei einem eindimensionalen Diffusionsvorgang über der dimensionslosen Kenngröße $\frac{D \cdot t}{l^2}$ dargestellt (s. z.B. /3/). Weiterhin ist unterhalb der Abbildung eine aus Messungen resultierende Wertetabelle angegeben. Mit Hilfe dieser graphischen Darstellung und den Tabellenwerten läßt sich $D_{\text{He-Lu}}$ folgendermaßen bestimmen: Zur Zeit $t = 10 \text{ h}$ wurde C_{V}/Co zu 0,380 aus der gemessenen Druckdifferenz ermittelt. Aus der Kurve bestimmt man zu diesem Wert die Kenngröße $\frac{D \cdot t}{l^2}$ zu 0,116. Mit $t = 36.000 \text{ sec}$ und $l = 450 \text{ cm}$ erhält man somit $D = 0,653 \text{ cm}^2/\text{sec}$. Entsprechendes Vorgehen zu anderen Zeitpunkten lieferten die anderen Werte für den Diffusionskoeffizienten. Der Mittelwert dieser Ergebnisse beträgt $D_{\text{He-Lu}} = 0,660 \text{ cm}^2/\text{sec}$. Zu beachten ist, daß der Diffusionsversuch über 70 h lief und daß die Umgebungstemperatur während dieser Zeit die üblichen Schwankungen von einigen Graden aufwies.

Vergleicht man den experimentell ermittelten Wert mit dem errechneten, so zeigt sich immerhin ein Unterschied von 20 %. Wenn auch die experimentelle Bestimmung ohne große Vorbereitun-

gen gewissermaßen nebenher erfolgte, so muß doch diesem Wert mehr Kredit gegeben werden als dem berechneten. Das wird auch dadurch gestützt, daß die Berechnung von Diffusionskoeffizienten mit komplizierteren Formeln im Rahmen der Chapman-Enskog-Theorie für Stickstoff-Helium-Gemische Diffusionskoeffizienten $\sim 0,7 \text{ cm}^2/\text{sec}$ liefert.

Zum Schluß sei noch der Hinweis gegeben, daß Luft-Helium natürlich kein binäres Gasgemisch darstellt. Strenggenommen mußte die Diffusion aller Luftbestandteile wie Sauerstoff, Stickstoff etc. gegen und im Helium sowie in- und gegeneinander betrachtet werden. Der Aufwand für eine exakte Behandlung in Relation zum Gewinn ist aber nicht zu rechtfertigen. Daß man Luft als ein-komponentiges Gas bei derartigen Diffusionsvorgängen betrachten kann, liegt einfach daran, daß Stickstoff bei weitem in der Luft dominiert und die zweite wesentliche Komponente Sauerstoff hinsichtlich der diffusionsrelevanten physikalischen Eigenschaften nicht gravierend verschieden von N_2 ist.

4. VERGLEICH VON THEORIE UND EXPERIMENT

Abb. 10 zeigt die experimentellen Kurven und die nach dem in Abschnitt 3.1 dargestellten Verfahren berechneten Luftkonzentrationsverläufe. Die theoretischen Kurven weisen nach 540 h etwa 15 % Luftgehalt im Behälter aus, während eine 20 %ige Luftkonzentration gemessen wurde. Die Wahl der Randbedingung bei den Rechnungen (s. Abschn. 3) beeinflusst das theoretische Ergebnis nur unwesentlich.

Gründe für die Abweichungen von Experiment und Theorie können zum einen in der vereinfachten Modellierung des Systems liegen; zum anderen konnten kleine Undichtigkeiten am Behälter das Ergebnis verfälschen. Auch Undichtigkeiten der Sauerstoffmeßvorrichtung, die kontinuierlich einen kleinen Gasstrom aus dem Behälter abzieht, dessen Sauerstoffgehalt ermittelt und dann wiederum das Gas in den Behälter einbringt, können im Laufe des drei Wochen dauernden Versuchs die Luftkonzentration der Behälteratmosphäre beeinflussen. Im großen und ganzen sollte der Vergleich von Theorie und Experiment als zufriedenstellend gewertet werden, zumal eine Ähnlichkeit der Kurvenverläufe un-

verkennbar ist. Das Experiment hat auf jeden Fall gezeigt, daß keine konvektiv gesteuerten Vorgänge auftreten, die einen schnellen Gasaustausch bewirken.

Abbildungen 11, 12 zeigen die gemessenen und errechneten Verläufe der statischen Druckdifferenz zwischen der Gassäule im Rohr und der Umgebungsluft. Die mit der Randbedingung der vollständigen Durchmischung erzielten Ergebnisse liefern eine vor allem für längere Zeiten bessere Übereinstimmung mit den Meßwerten.

Die Abb. 13 zeigt Rechnungen zur Untersuchung der Einflußfaktoren. Die größte Auswirkung auf den Gasaustausch hat das durch Temperaturschwankungen bedingte 'Atmen' des Behälters. Das Nichtberücksichtigen der Luftdruckschwankungen hat keine gravierende Bedeutung.

Eine Vernachlässigung der Diffusion bei den relativ langsamen Austauschvorgängen macht sich schon deutlicher bemerkbar. Würde man davon ausgehen, daß der Gasaustauschprozeß über das Rohr ein reiner Diffusionsvorgang wäre, so würde man in den 540 h etwa 3 - 4 % Luft in der Behälteratmosphäre erwarten können.

5. ÜBERTRAGUNG DER ERGEBNISSE AUF DEN GASAUSTAUSCH ZWISCHEN DEM PRIMÄRKREIS DES MODULS UND DEM REAKTORSCHUTZGEBÄUDE

Nach dem Abriß des Brennelementbeschickungsrohres kommt es zunächst zu einer schnellen Druckentlastung, die nach einigen Minuten bei Erreichen des Umgebungsdrucks abgeschlossen ist. Dann erwärmt sich das im Primärkreis verbliebene, entspannte Helium innerhalb von 95 h von im Mittel 210 °C auf einen Maximalwert von 290 °C. Anschließend kühlt es sich wieder ab und erreicht nach 500 h im Mittel 233 °C /4/.

Die Zustandsänderung des Gases im Primärkreislauf bewirkt, daß in den ersten 95 h Helium wegen der Temperaturerhöhung aus dem Primärkreislauf (460 m³ gaserfülltes Volumen) über das Beschickungsrohr ausgetrieben wird. Im Zeitbereich über 95 h wird aus der Atmosphäre des Reaktorschutzgebäudes Luft bzw. ein Helium-Luft-Gemisch in den Primärkreis eingesaugt, da die im Mittel stattfindende Abkühlung eine Kontraktion des Primärkreisgases bewirkt.

Zur Ermittlung des Gasaustauschs unter den gegebenen Bedingungen wird von der im Experiment verifizierten Gl. (3.1) ausgegangen, was sich in diesem Falle besonders einfach gestaltet. Die Berechnung der Luft- bzw. Heliumkonzentrationsverteilung nach Gl. (3.1) innerhalb des Rohres, die durch Konvektion und Diffusion bestimmt wird, ist nämlich immer dann trivial, wenn für die innerhalb des Rohres herrschende Geschwindigkeit v gilt:

$$v \gg \frac{D_{\text{He-Lu}}}{L_{\text{Rohr}}} \quad (5.1)$$

Um dies einzusehen, sei die folgende Situation betrachtet: Ein Rohr der Länge L_{Rohr} werde von Helium mit der Geschwindigkeit v durchströmt. An einem der Rohrenden möge das Helium in ein anderes gasförmiges Medium, etwa Luft, einfließen. Die Luft versucht nun gegen den Strom in das Helium einzudiffundieren.

Unter stationären Bedingungen schreibt sich die den Konzentrationsverlauf der Luft im Rohr bestimmende Gleichung (3.1):

$$D_{\text{He-Lu}} \cdot \frac{\partial^2 c_{\text{Lu}}}{\partial x^2} - v \cdot \frac{\partial c_{\text{Lu}}}{\partial x} = 0 \quad (5.2)$$

Für $v < 0$ liefert eine zweimalige Integration

$$c_{\text{Lu}} = A \cdot e^{-\frac{|v|}{D_{\text{He-Lu}}} \cdot x} + B \quad (5.3)$$

Die Größe $D_{\text{He-Lu}}/|v|$ in der Exponentialfunktion ist ein Maß für die diffusionsbedingte Eindringtiefe der Luft in das durchströmte Rohr hinein.

Wenn die Eindringtiefe klein gegen die Rohrlänge ist, was gleichbedeutend mit der Gültigkeit der Ungleichung (5.1) ist, so dringt praktisch keine Luft in das Rohr ein. Man hat somit fast ausschließlich abströmendes Helium im Rohr. Die Luftkonzentration im Rohr ist abgesehen von einer kleinen Störzone am Rohrende überall gleich Null. Daher kann der Heliumstrom durch das Rohr einfach als Produkt aus Rohrquerschnitt und Strömungsgeschwindigkeit v errechnet werden.

In dem hier betrachteten Fall des Gasaustausches über das abgerissene Beschickungsrohr trifft die Ungleichung (5.1) in jeder Phase zu. Während der Austreibphase strömt Helium mit etwa 0,05 m/sec ab, während beim Einsaugen mit $v \sim 0,01$ m/sec zu rechnen ist. Der Diffusionskoeffizient $D_{\text{He-Lu}}$ liegt im Bereich 10^{-4} m²/sec, so daß man für ein Rohr mit etlichen Metern Länge die Ungleichung leicht verifiziert. In der Austreibphase wird man somit im Rohr Helium vorliegen haben, gegen das die Luft des Reaktorschutzgebäudes nicht andiffundieren kann.

Umgekehrt wird man in der Phase des Einsaugens Luft bzw. das Gasgemisch des Schutzgebäudes im Rohr vorfinden, das wegen der relativ (gemessen an Diffusionsvorgängen) großen Geschwindigkeit ein Austreten des Primärkreisheliums komplett verhindert.

Bei Kenntnis des gerade dargestellten Sachverhalts läßt sich unter der Voraussetzung, daß sich die Gase im Primärkreislauf ideal verhalten, der Heliumausstoß und der Lufteintrag recht einfach ermitteln, ohne daß man direkt auf Gl. (3.1) zurückzugreifen braucht. Die Berechnung des Gasaustausches gestaltet sich somit erheblich einfacher als bei den durchgeführten Versuchen, bei denen die Ungleichung (5.1) nicht zutraf.

Bei aufgeprägtem Druck (Luftdruckschwankungen können vernachlässigt werden) ergibt sich die Änderung der totalen Molzahl im Primärkreislauf nur über die Temperaturänderung. Man erhält anhand einfacher Überlegungen die folgende Differentialgleichung für die Molzahl N

$$\frac{dN}{dt} = - \frac{N}{T} \cdot \frac{dT}{dt} \quad (5.4)$$

Für stückweise lineare mittlere Temperaturverläufe $T [K] = \alpha_i \cdot t [h] + \beta_i$ $t_{i-1} \leq t < t_i$ lautet die Lösung von (5.4)

$$N(t) = \frac{C_i}{\alpha_i \cdot t + \beta_i} \quad t_{i-1} \leq t < t_i \quad (5.5)$$

Mit den eben angegebenen Temperaturwerten, wobei lineares Verhalten sowohl im Bereich 0-95 h als auch für 95-500 h angesetzt wird, erhält man konkret (s. Abb. 14)

$$N(t) = \begin{cases} \frac{5532}{0,8421 \cdot t [h] + 483,15} \text{ [kmol]} & 0 \leq t < 95 \text{ h} \\ \frac{5532}{-1,407 \cdot t [h] + 576,5} \text{ [kmol]} & 95 \leq t < 500 \text{ h} \end{cases} \quad (5.6)$$

Nach 95 h sind im Primärkreis von 11,45 kmol Helium noch 9,82 kmol vorhanden. Danach strömt bedingt durch die Abkühlung Gas ein, wobei nach 500 h neben den 9,82 kmol He 1,1 kmol von außen eingesaugte oder zum Teil durch chemische Reaktionen erzeugte Gase im Primärkreislauf vorliegen. Geht man konservativ davon aus, daß es sich bei dem eingesaugten Gas um reine Luft handelt, so würden sich bei vollständiger Umsetzung des Sauerstoffs in CO 0,73 kmol N_2 und 0,37 kmol CO im Primärkreislauf befinden. Eine einfache Rechnung zeigt, daß durch die CO-Bildung nur etwa 4-5 kg Graphit (von über 100 Tonnen!) umgesetzt werden, was über die 500 h betrachtet einer Korrosionsrate unter 10 g/h entspricht.

6. SCHLUSSFOLGERUNGEN

Bei dem hier durchgeführten Versuch wurde festgestellt, daß Gas-austauschvorgänge über ein nach unten weisendes Rohr hauptsächlich durch das von Gastemperaturänderungen herrührende 'Atmen' des Behälters verursacht werden. Je nach Richtung der Änderung

wird Gas eingesaugt oder ausgestoßen. Es treten hierbei keine konvektiv gesteuerten Vorgänge auf, die einen schnellen Gasaustausch bewirken.

Bei hinreichend großen Raten der Temperaturänderung des Gases innerhalb des Behälters sind Diffusionsvorgänge im Rohr zu vernachlässigen, so daß sich die theoretische Beschreibung stark vereinfacht.

Im Falle des Abrisses des Brennelementbeschickungsrohres vollzieht sich der Gasaustausch über das temperaturinduzierte Ausstoßen bei Aufheizung bzw. Einsaugen bei Abkühlung der Primärkreisatmosphäre. Eine Berechnung des Lufteintrags in der Einsaugphase hat ergeben, daß die eindringenden Luftmengen keine großen Auswirkungen im Primärkreis verursachen.

7. LITERATUR

- /1/ Bird, R.B.; Stewart, W.E.; Lightfoot, E.N.
Transport Phenomena, Wiley New York, 1960
- /2/ Marsal, D.
Die numerische Lösung partieller Differentialgleichungen,
BI-Verlag Mannheim, 1976
- /3/ Carslaw, H.S.; Jaeger, J.C.
Conduction of Heat in Solids,
2. Aufl., Clarendon Press Oxford, 1959
- /4/ Lohnert, G.H., Firma INTERATOM - Bergisch Gladbach
Private Mitteilung.

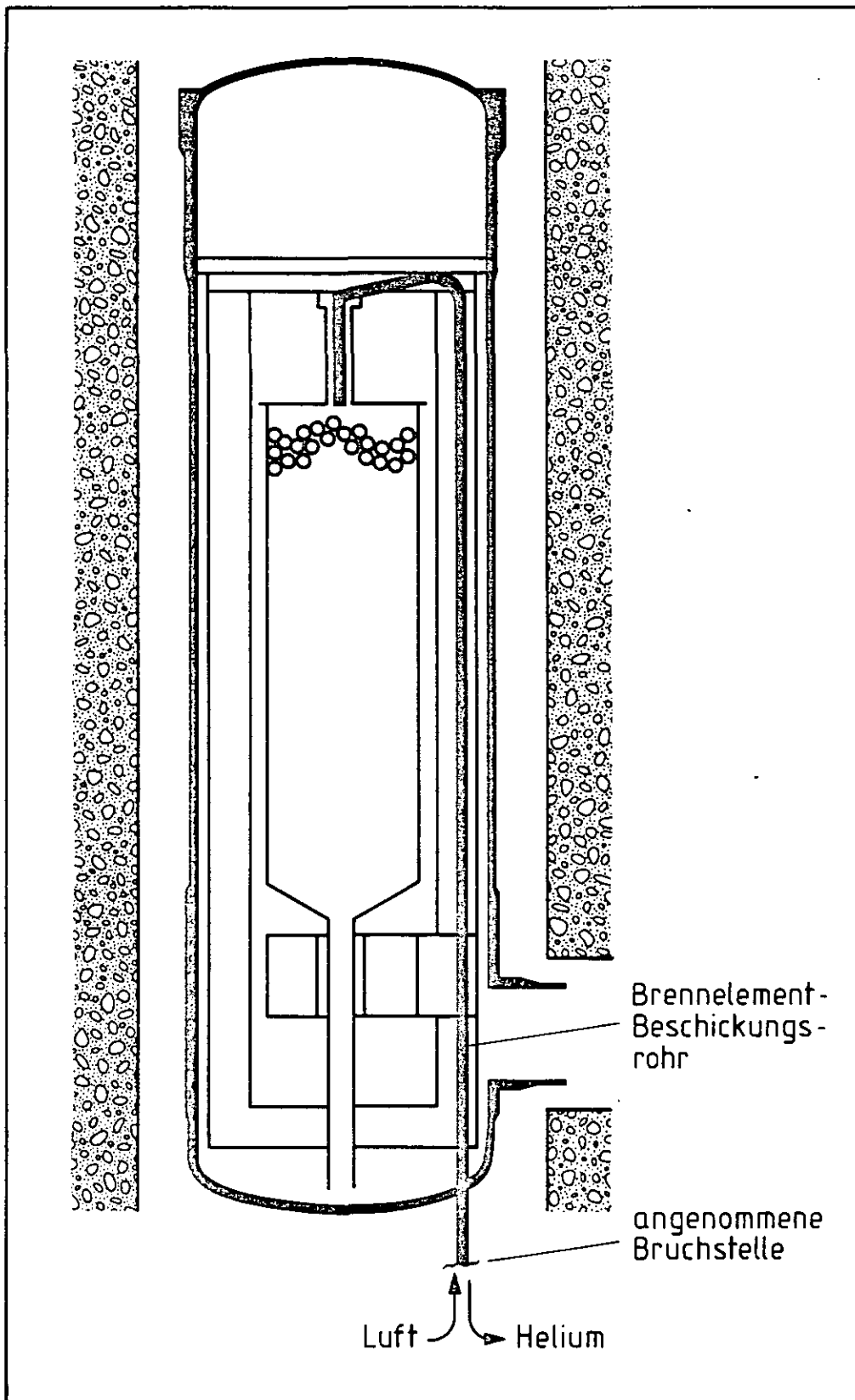


Abb. 1: HTR-Modul, Lage des Brennelement-Beschickungsrohres mit postulierter Bruchstelle

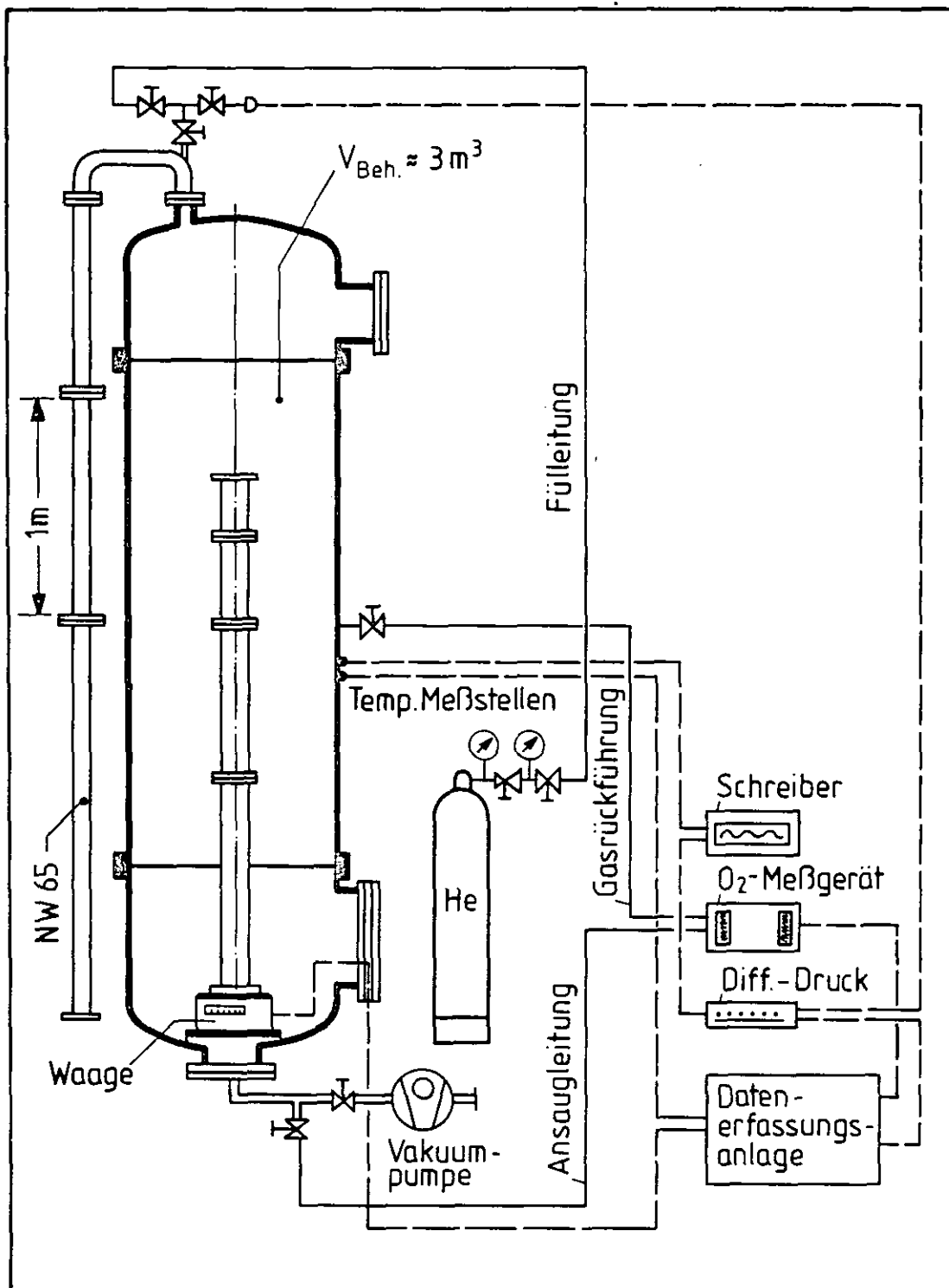


Abb. 2: Versuchsaufbau zur Untersuchung des Gasaustausches über ein nach unten abgehendes Rohr

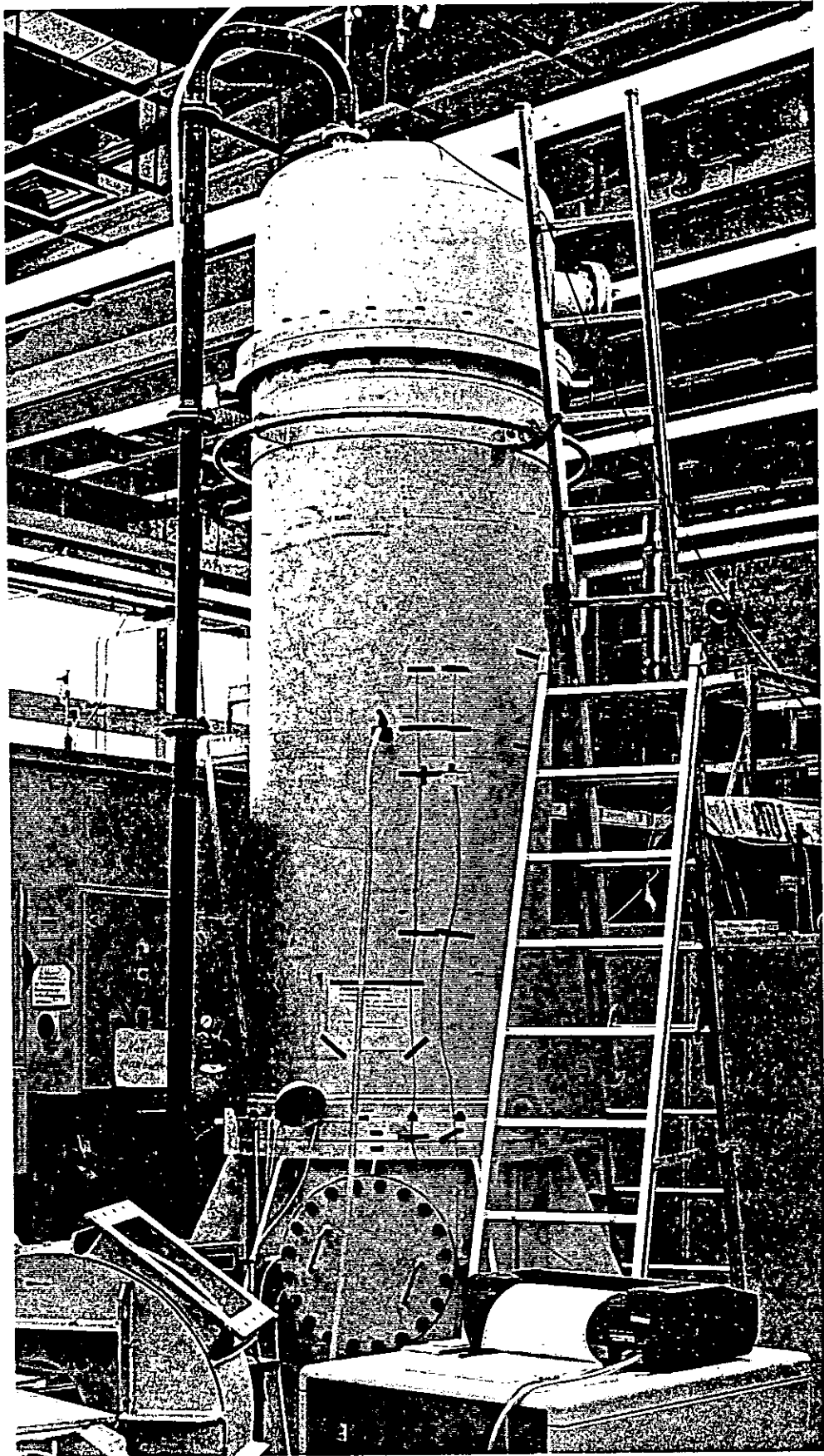


Abb. 3: Blick auf den Versuchsbehälter mit angeflanschem Rohr.

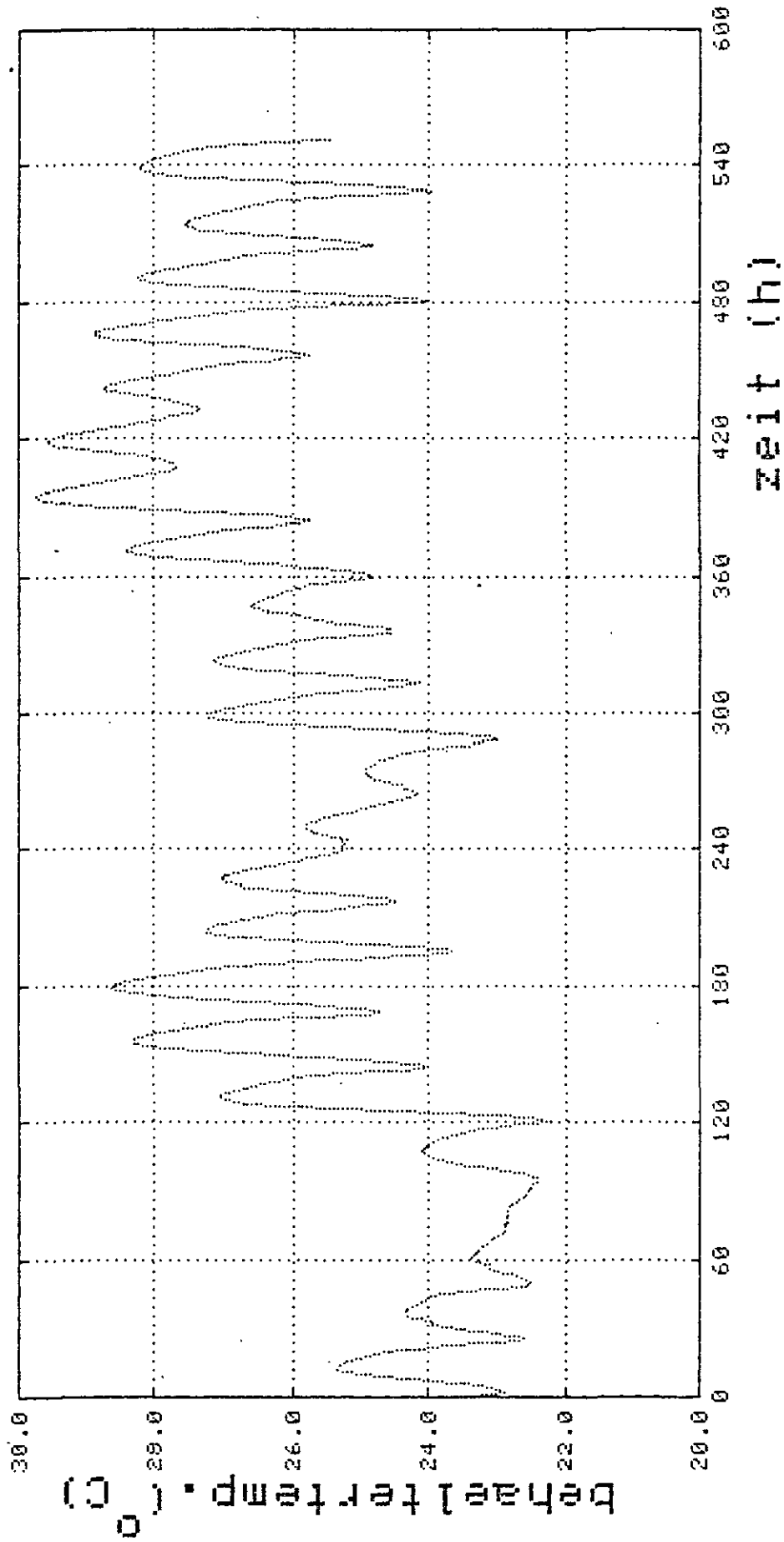


Abb. 4: Behältertemperatur während des Versuchs.
 t=0 entspricht 3. August 1983, 9.35. Es wird angenommen, daß das Gas innerhalb
 des Behälters mit den Wandungen im Temperaturgleichgewicht ist.

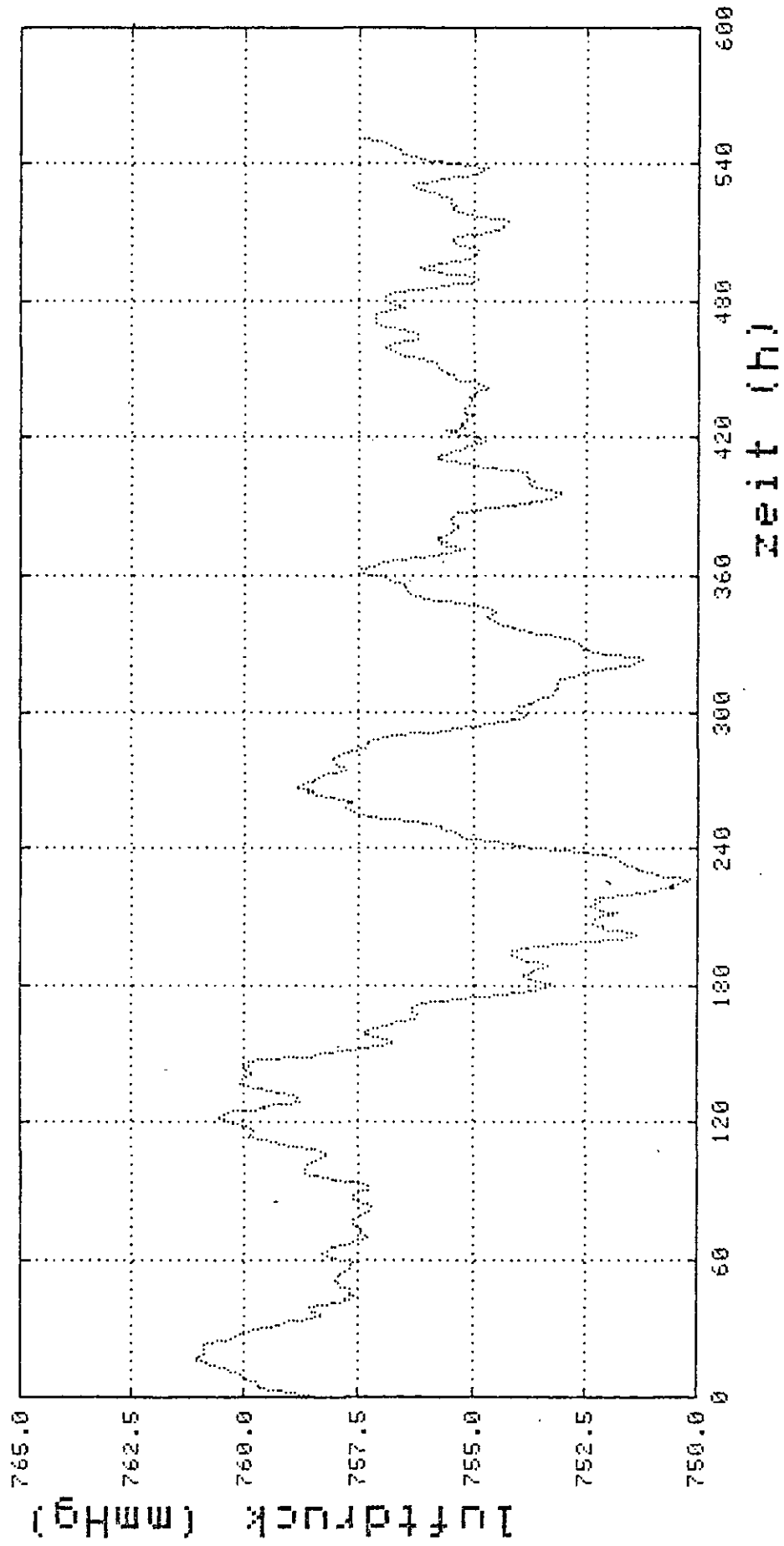


Abb. 5: Luftdruckverlauf während des Versuchs.
t = 0 entspricht 3. August 1983, 935.

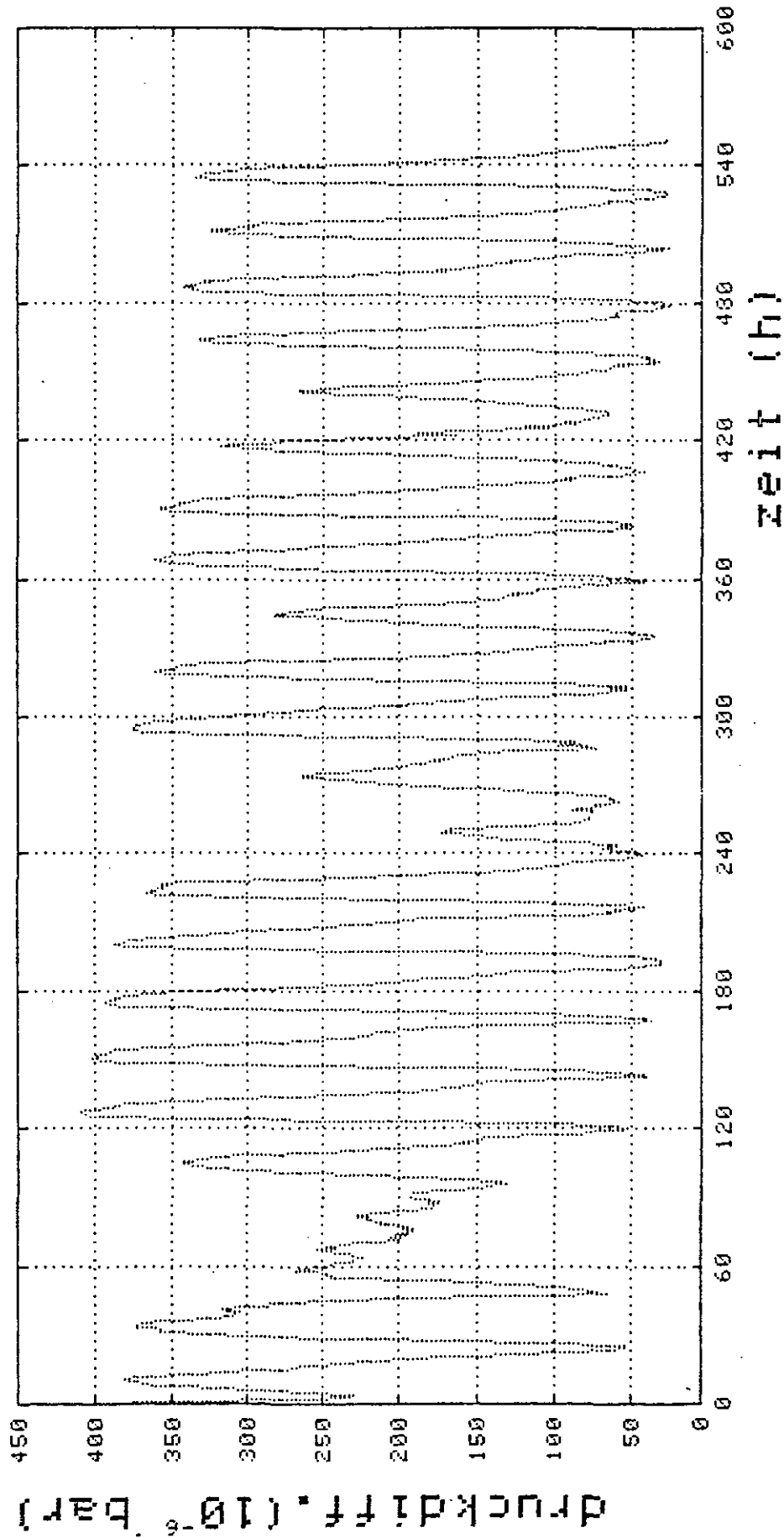


Abb. 6: Statische Druckdifferenz (μbar) zwischen der Gassäule im Rohr und der Umgebungsluft. Der Druckaufnehmer liegt etwa 4,3 m über der Öffnung des nach unten abgehenden Rohres.

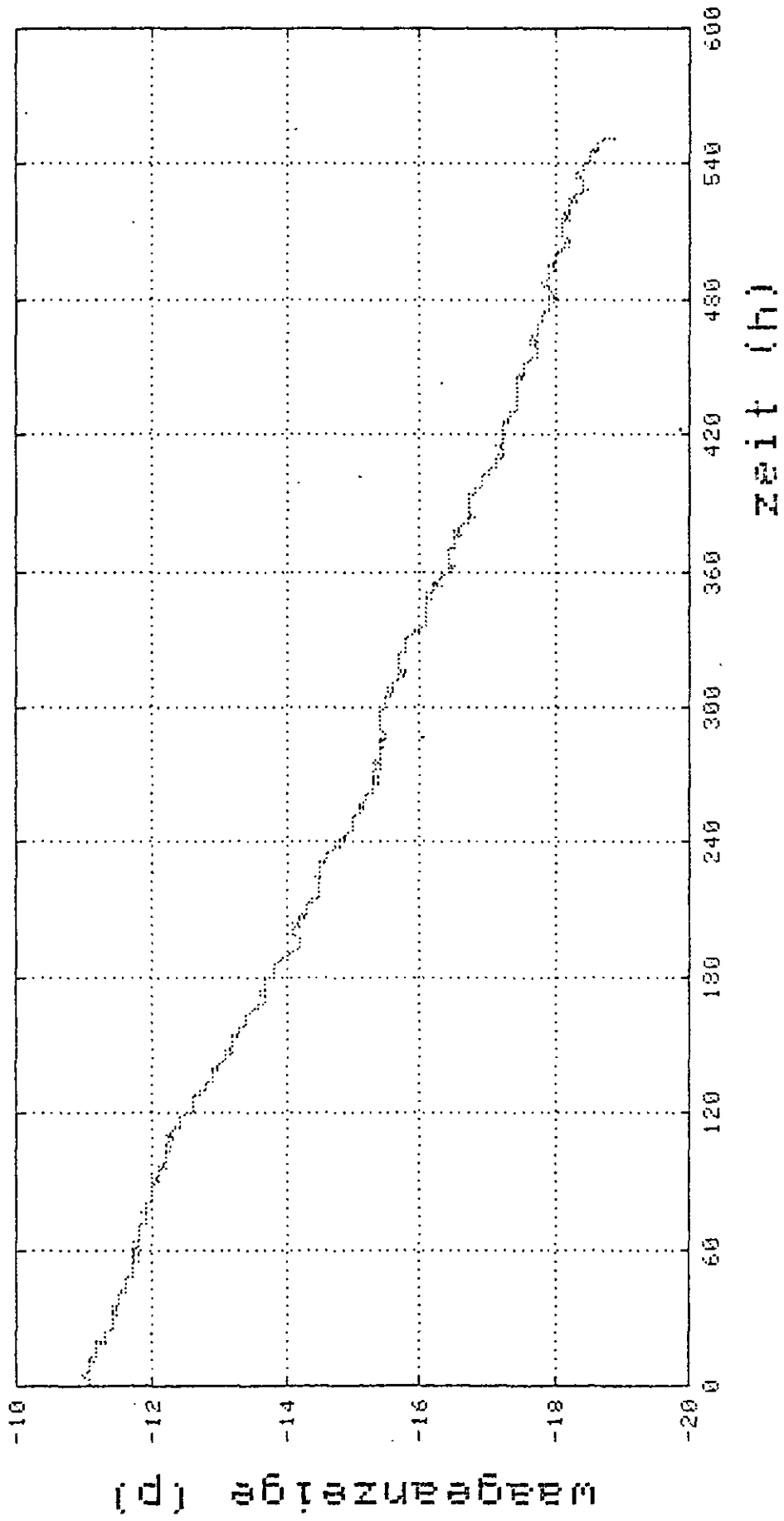


Abb. 7. Gewichtsänderung der Meßsäule durch ansteigenden Auftrieb. Die sich im Laufe der Zeit mit Luft vermischtende Heliumatmosphäre im Behälter wird schwerer, so daß der Auftrieb der Säule erhöht und somit die Waage etwas entlastet wird.

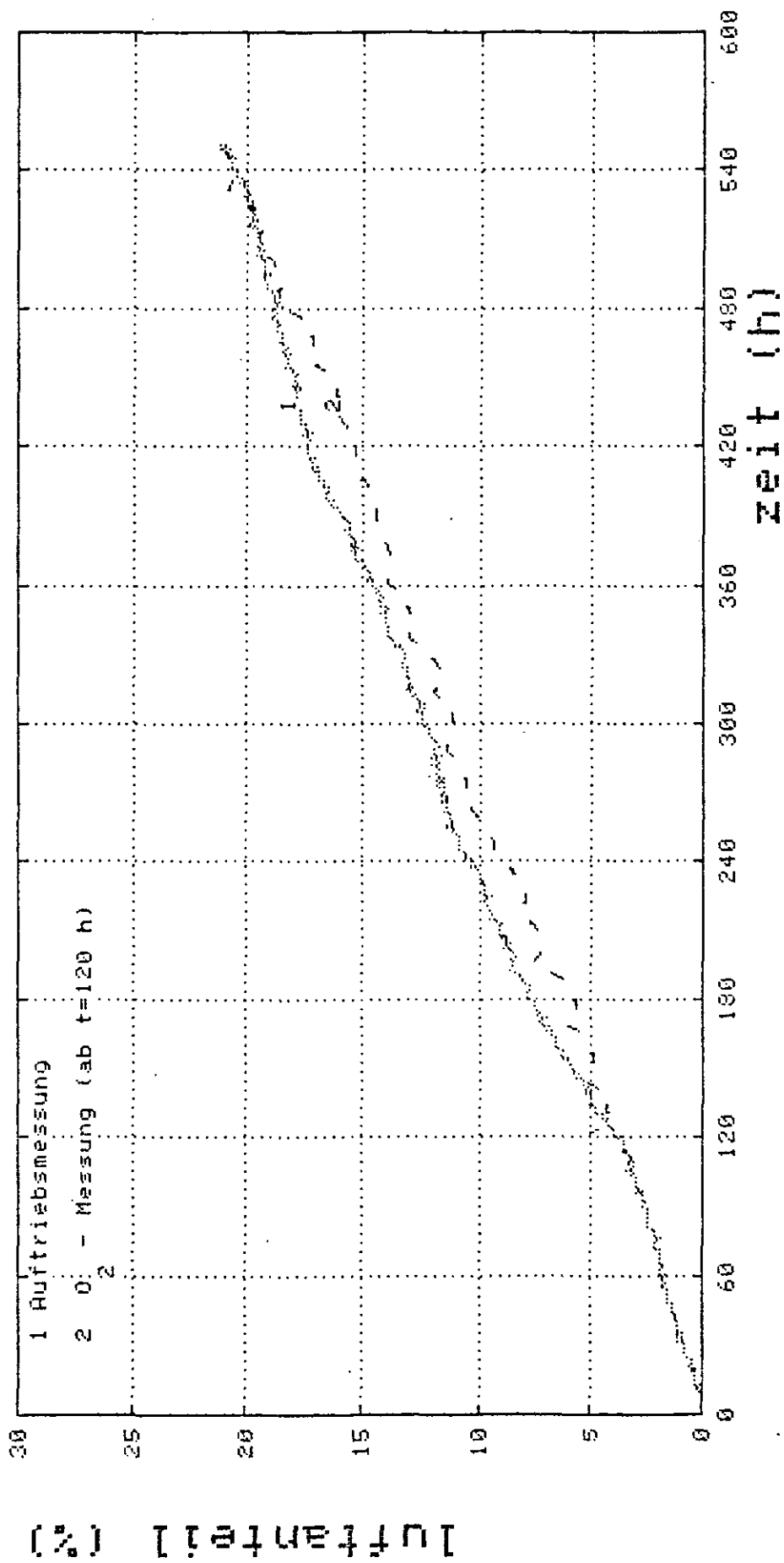


Abb. 8: Experimentell aus der Auftriebs- sowie einer direkten Sauerstoffmessung ermittelte Luftanteile im Behälter über die Versuchszeit von 550 h.

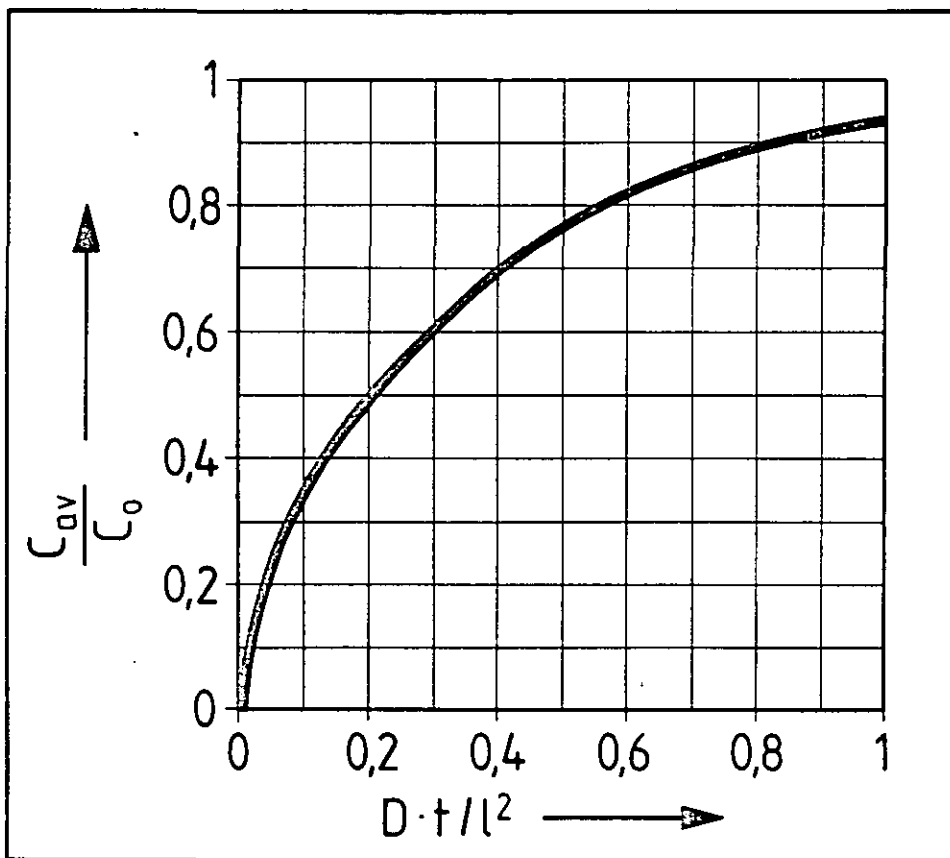


Abb. 9: Mittlere Dichte als Funktion der Kenngröße $\frac{D \cdot t}{l^2}$ bei einem eindimensionalen Diffusionsvorgang

Tabelle: Gemessene mittlere Dichten im Rohr und daraus ermittelte Diffusionskoeffizienten

Zeit h	C_{av}/C_0	$D \cdot t / l^2$	D [cm ² /sec]
10	0,380	0,116	0,653
20	0,540	0,240	0,675
30	0,655	0,348	0,653
40	0,740	0,475	0,668
50	0,802	0,580	0,653
60	0,847	0,700	0,656
70	0,887	0,820	<u>0,659</u>
			0,660

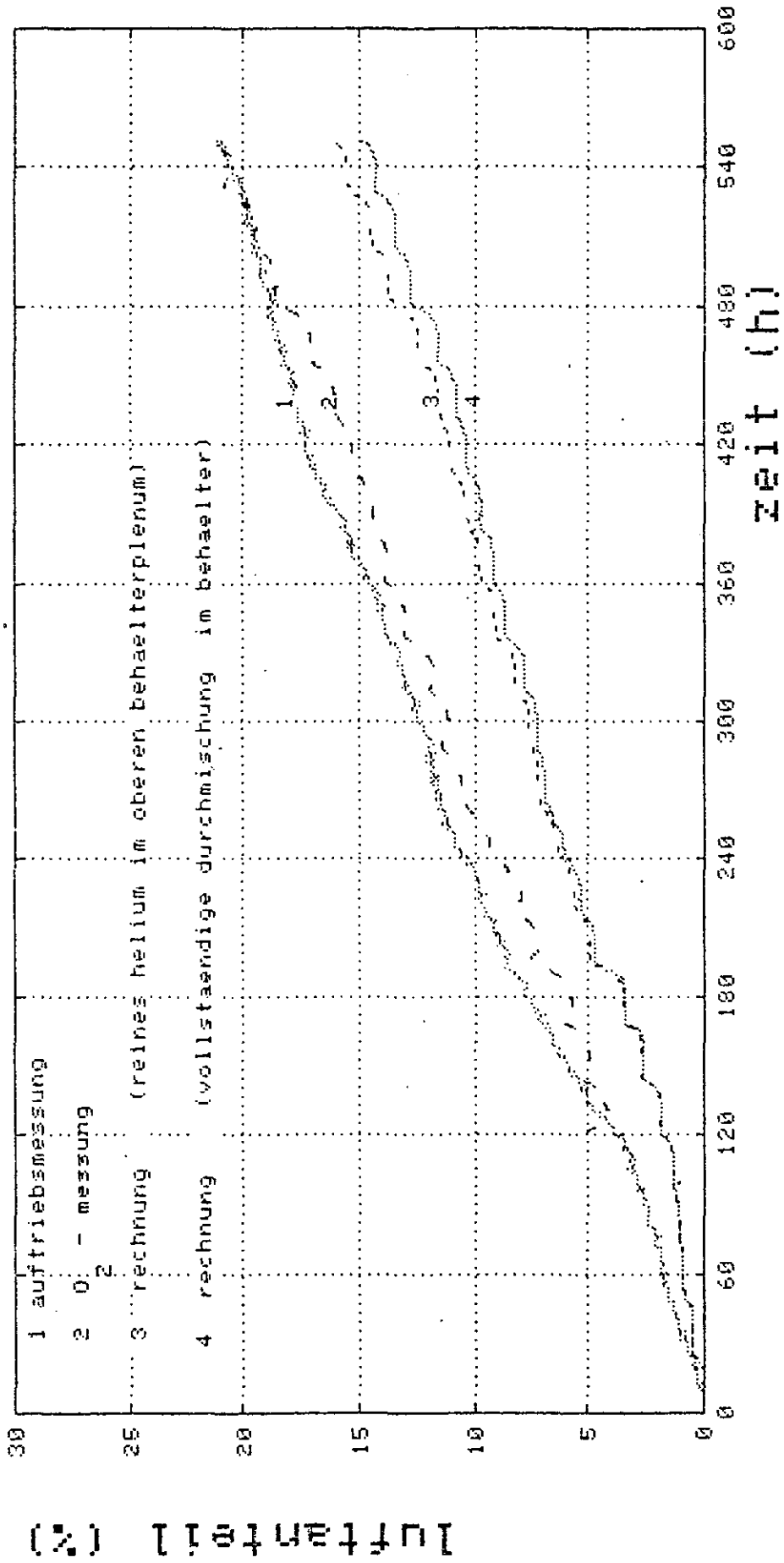


Abb. 10: Vergleich des experimentell und des errechneten Luftanteilverlaufs. Parameter in der Rechnung: Rohrlänge = 4,3 m, Rohrdurchmesser 0,069 m, Behältervolumen: $2,93 \text{ m}^3$, Diffusionskonstante Helium-Luft = $6,6 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{sec}$.

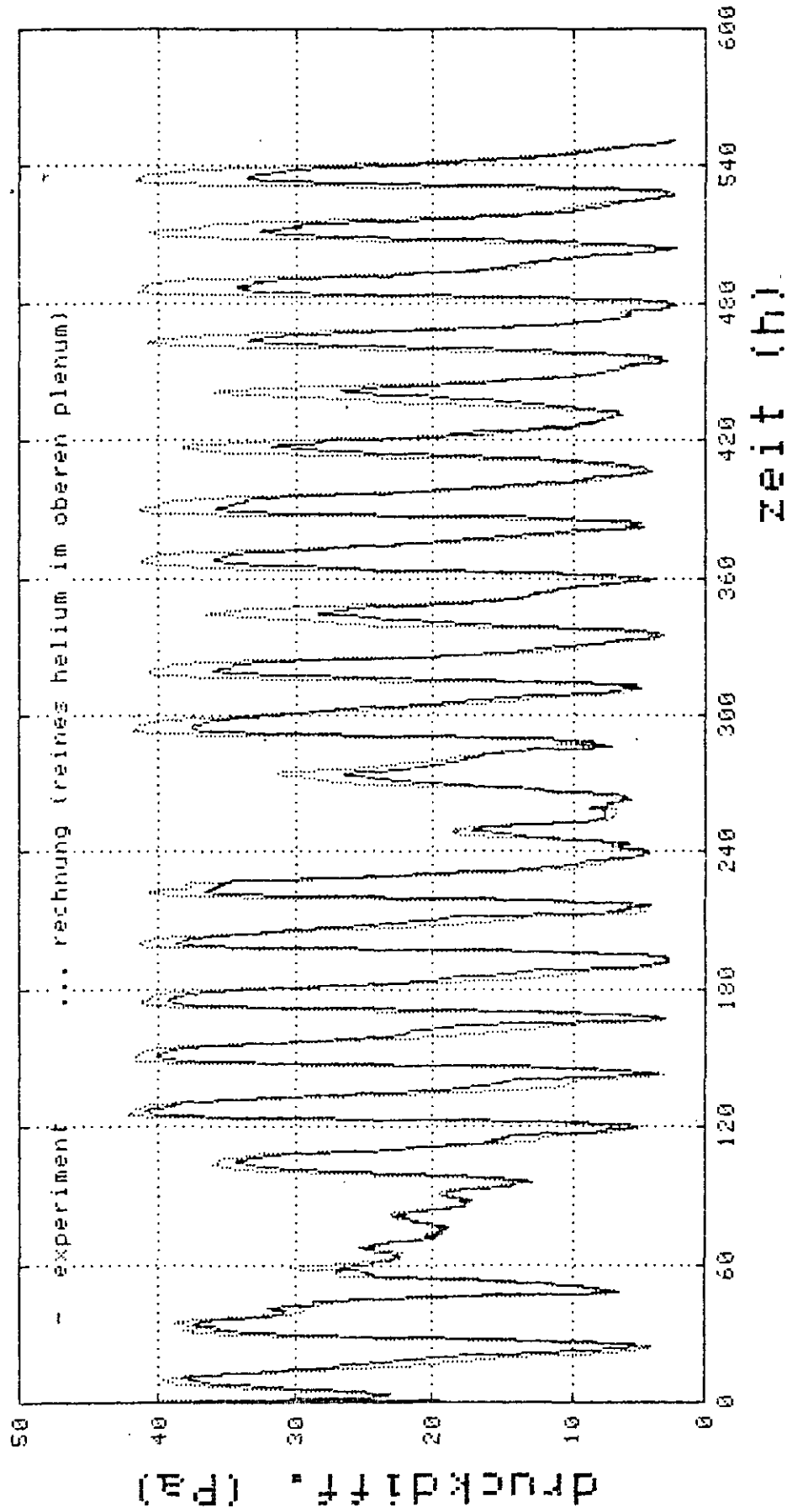


Abb. 11: Gemessene und errechnete stat. Druckdifferenz (Pa) zwischen der Gassäule im Rohr und der Umgebungsluft. Rechnung unter der Annahme, daß im oberen Bereich des Behälters stets reines Helium ansteht (geschichtete Atmosphäre innerhalb des Behälters).

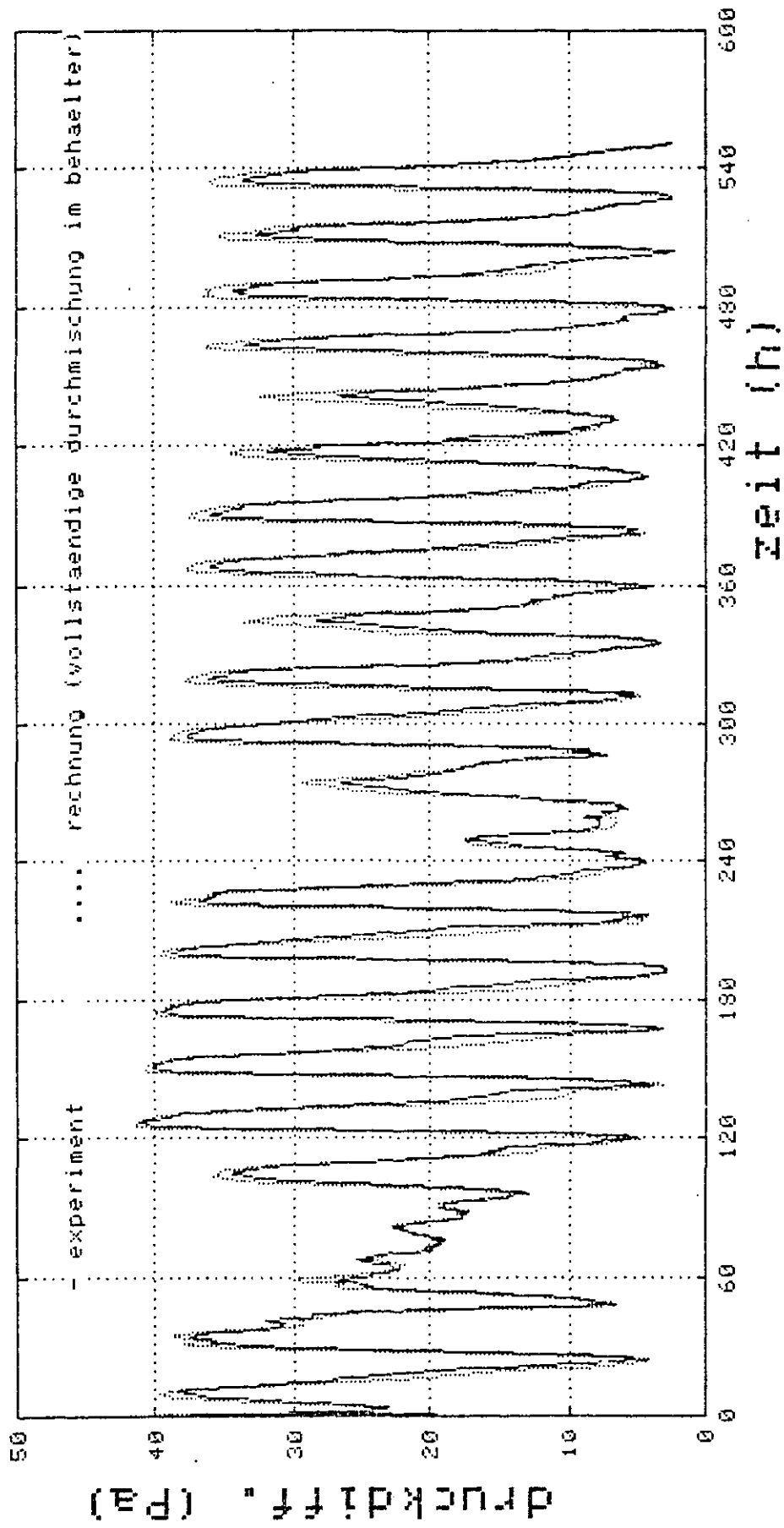


Abb. 12: Wie Abb. 11. Rechnung hier unter der Annahme einer vollständigen Durchmischung im Behälter.

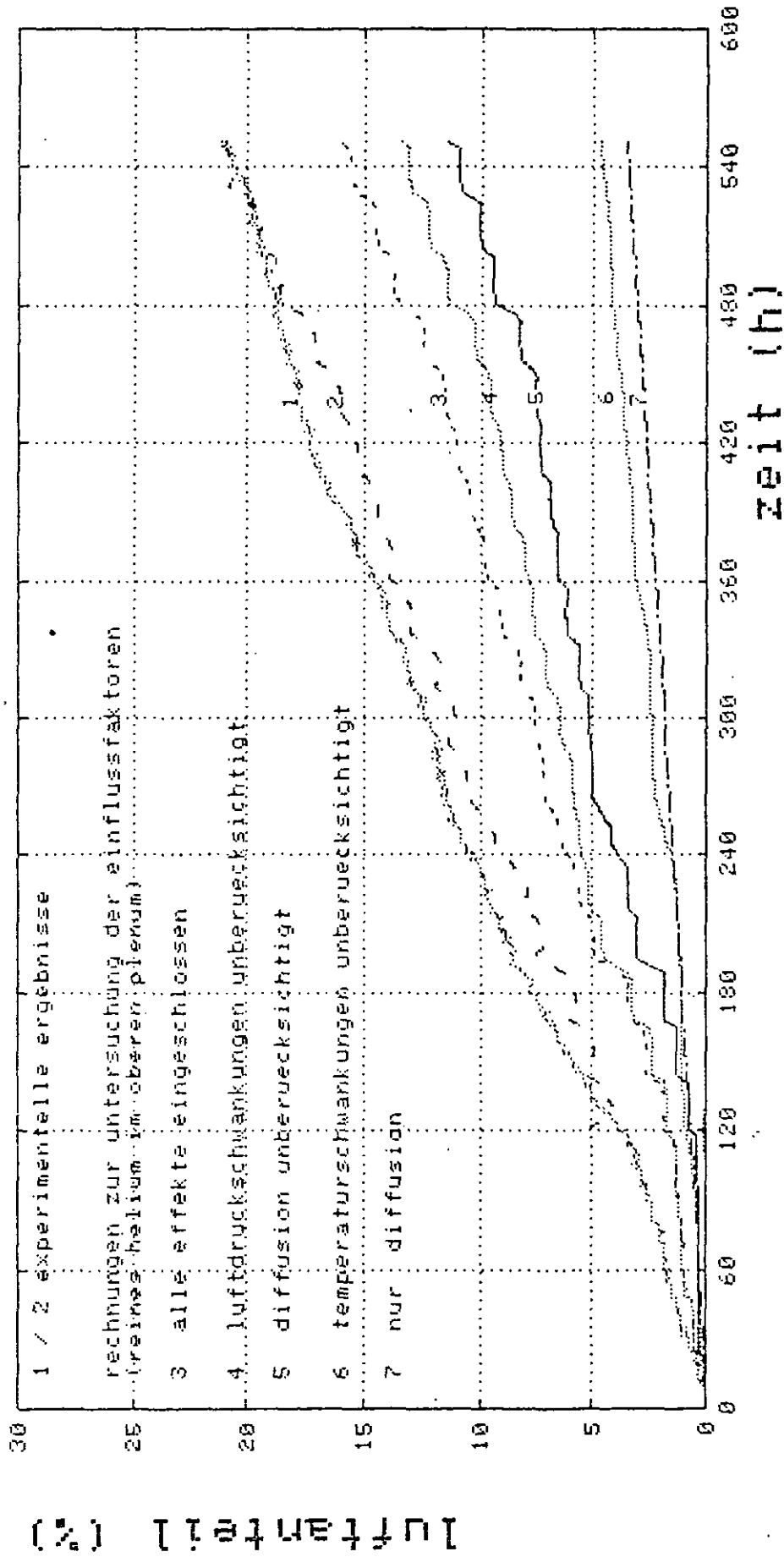


Abb. 13: Rechnungen zur Untersuchung der Einflussfaktoren. In Kurve 3 sind Temperatur-, Druckschwankungen und Diffusion berücksichtigt. In Kurven 4-6 ist jeweils ein Faktor vernachlässigt, während Kurve 7 sich auf reine Diffusion (keine Druck- und Temperaturschwankungen) bezieht.

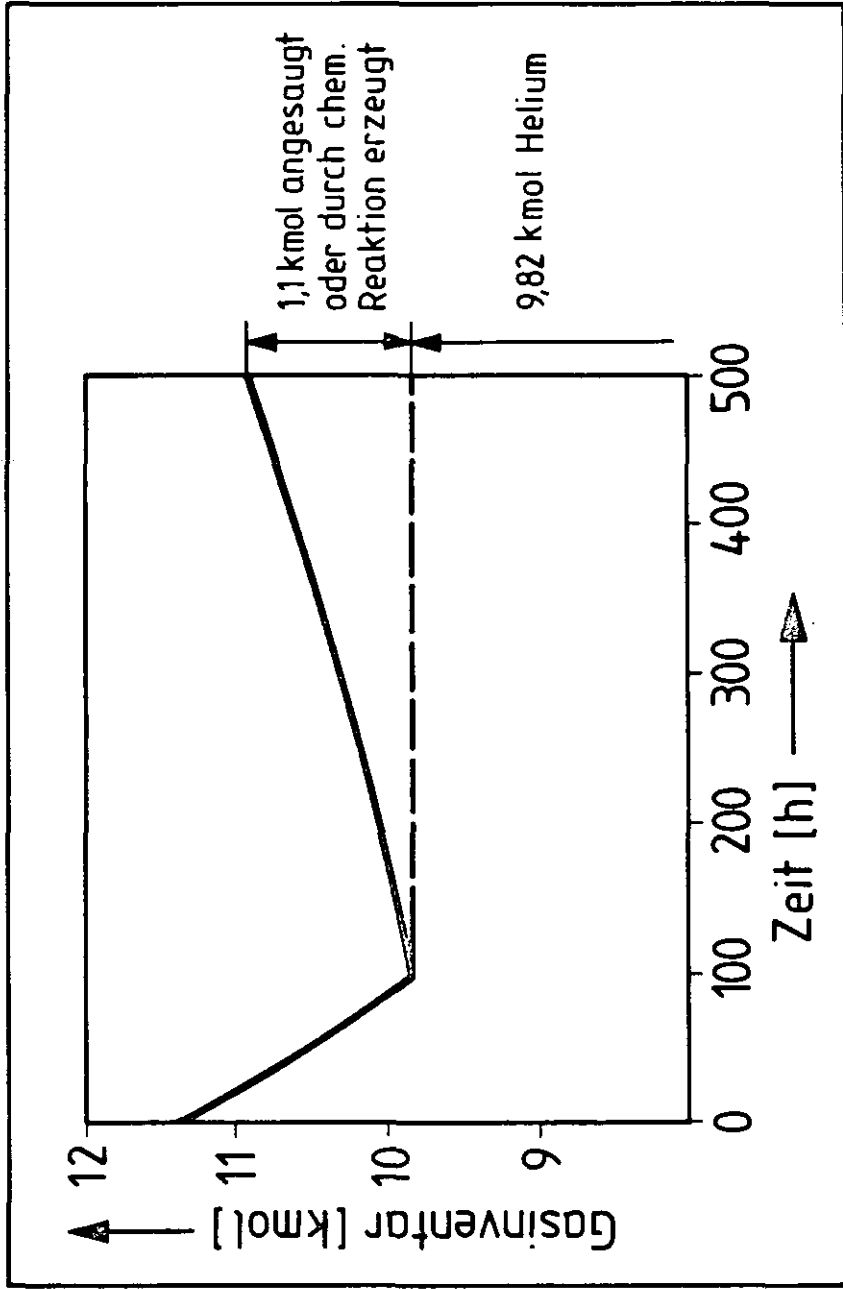


Abb. 14: Gasinventar des Primärkreislaufs über 500 h