



KERNFORSCHUNGSANLAGE JÜLICH GmbH

Institut für Nukleare Sicherheitsforschung

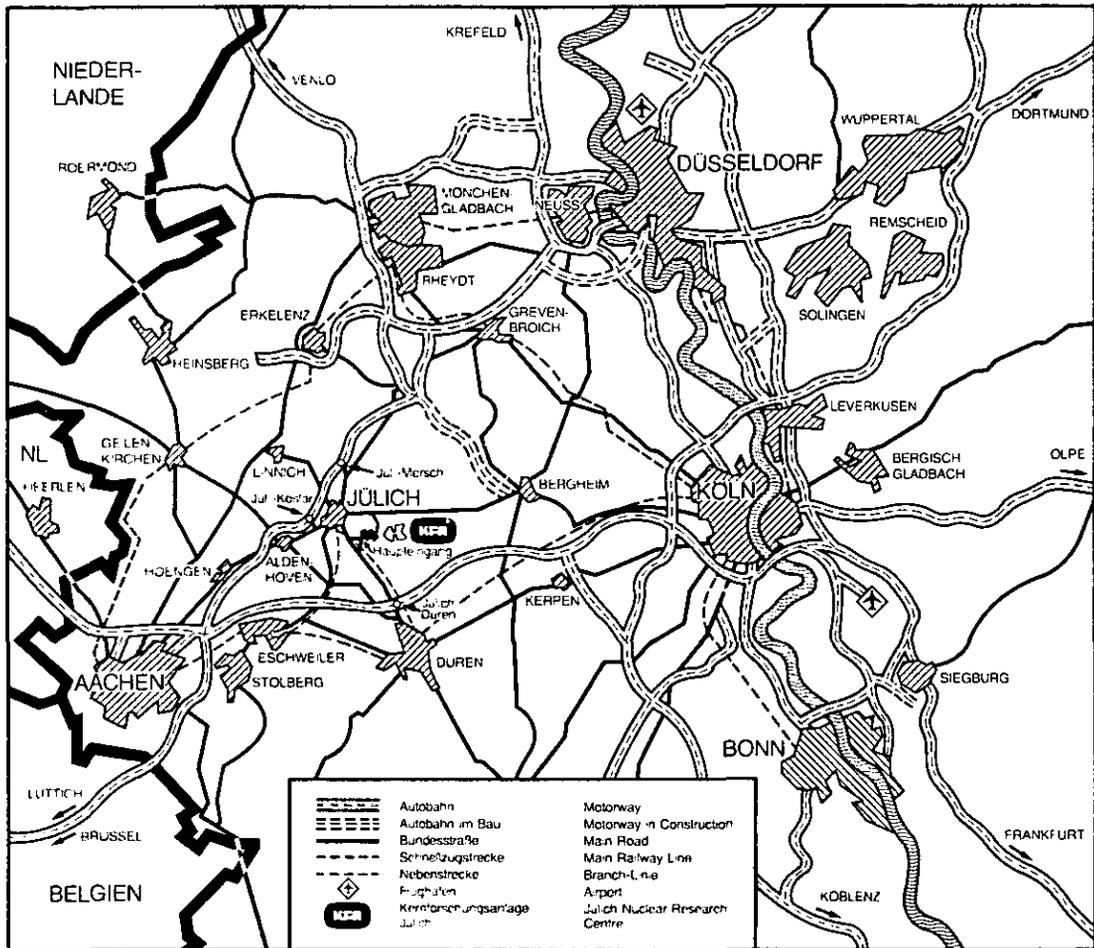
**Ausström- und Gasaustauschvorgänge
nach Lecks im Primärkreislauf
von Hochtemperaturreaktoren**

von

G. Breitbach, H.P. David,

M. Nickel, J. Wolters

Jül-Spez-469
Oktober 1988
ISSN 0343-7639



Als Manuskript gedruckt

Spezielle Berichte der Kernforschungsanlage Jülich – Nr. 469
Institut für Nukleare Sicherheitsforschung Jül-Spez-469

Zu beziehen durch: ZENTRALBIBLIOTHEK der Kernforschungsanlage Jülich GmbH
 Postfach 19 13 · D-5170 Jülich (Bundesrepublik Deutschland)
 Telefon: 02461/610 · Telex: 833556-0 kf d

linght.

Ausström- und Gasaustauschvorgänge nach Lecks im Primärkreislauf von Hochtemperaturreaktoren

von

G. Breitbach, H.P. David

M. Nickel, J. Wolters

KURZFASSUNG

Wenn in der druckführenden Umschließung eines heliumgekühlten Hochtemperaturreaktors ein Leck auftritt, so kommt es in der ersten Phase zu einem schnellen Ausströmen des Kühlgases. Nach Abschluß der Druckentlastung setzen Gasaustauschvorgänge ein, die durch Konvektion, Diffusion und durch das sogen. 'Atmen' des Primärkreislaufs bestimmt werden.

Es werden theoretische Modelle zur Behandlung der Vorgänge vorgestellt. Weiterhin wird auf experimentelle Untersuchungen zu den Austauschvorgängen eingegangen. Die aufgetretenen Phänomene werden diskutiert und Theorie und Experiment verglichen.

FLOW AND GAS EXCHANGE PROCESSES AFTER LEAKS IN THE PRIMARY CIRCUIT OF HIGH TEMPERATURE REACTORS

Abstract

The occurrence of leaks in the pressurized enclosure of an Helium cooled High Temperature Reactor leads in a first step to a rapid outflow of the cooling gas. After loss of pressure gas exchange processes start governd by convection, diffusion and the so called '*breathing*' of the primary circuit.

Theoretical models for the treatment of the processes are presented. Further experimental investigations are reported. The phenomena are discussed and theory and experiments are compared.

INHALTSVERZEICHNIS

	<u>Seite</u>
1. Einleitung.....	3
2. Leckpositionen.....	3
3. Die Phasen nach dem Auftreten von Lecks.....	5
3.1 Druckentlastung.....	6
3.2 Gasaustauschvorgänge nach Druckausgleich.....	7
4. Einfache theoretische Rechenmodelle.....	9
4.1 Rechenmodell für konvektiven Austausch.....	9
4.2 Rechenmodell für Gasaustausch über Diffusion.	15
4.3 'Atemeffekte'.....	17
5. Experimentelle Untersuchungen.....	18
5.1 Gasaustausch über Rohrleitungen.....	19
5.1.1 Gasaustausch über eine lange und nach untengerichtete Rohrleitung.....	19
5.1.2 Gasaustausch über Rohrstücke unter schiedlicher Neigung.....	22
5.2 Gasaustausch über ringspaltförmige Lecks....	25
5.3 Gasaustausch über große Öffnungen.....	28
6. Schlußbemerkungen.....	30
7. Literatur.....	31

1. EINLEITUNG

Das Primärkreislaufkühlmedium des Hochtemperaturreaktors (HTR) ist unter einem Druck von 40-50 bar stehendes Helium /1/. Wenn es in der druckführenden Umschließung des Primärkreislaufs (PK) zu einem Leck kommt, so wird es wegen des hohen Druckniveaus im PK zu einem schnellen Ausströmen von Helium kommen. Helium wird so lange in das Reaktorschutzgebäude (RSG) ausgetrieben, wie eine merkliche Druckdifferenz zwischen PK und RSG herrscht. Nach eingetretenem Druckausgleich liegt nun die Situation vor, daß sich in den Bereichen PK und RSG Gase bzw. Gasgemische unterschiedlicher Konzentration und Temperatur befinden. Entsprechend der Lage und Orientierung des Lecks setzen nun Gasaustauschvorgänge zwischen PK und RSG ein, die je nach Position und Orientierung des Lecks von verschiedenen Mechanismen gesteuert werden. Die Austauschvorgänge bewirken zweierlei:

- Es werden Spaltprodukte aus dem PK ausgetragen,
- es gelangt Luftsauerstoff aus dem RSG an die im Core befindlichen heißen Graphitstrukturen, so daß man mit Korrosionsprozessen (Bildung von CO/CO₂) zu rechnen hat.

2. LECKPOSITIONEN

Bevor man das Gasaustauschproblem in Angriff nimmt, muß man sich mit der Position und der Orientierung von Lecks beschäftigen. Es ist kompliziert und in vielen Fällen praktisch nicht möglich, die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten eines Lecks an einer bestimmten Stelle anzugeben und damit die relevanten kritischen Stellen zu identifizieren. Von daher gesehen ist man auf das Postulieren von Leckpositionen angewiesen.

Als charakteristische Bruchstelle wird der Abriss einer Versorgungsleitung angesehen. Die Durchmesser solcher Leitungen reichen bis etwa 65 mm. Ein Beispiel ist die Annahme des Abrisses des Brennelementbeschickungsrohres beim HTR-Modul (s. Abb. 1) /2/.

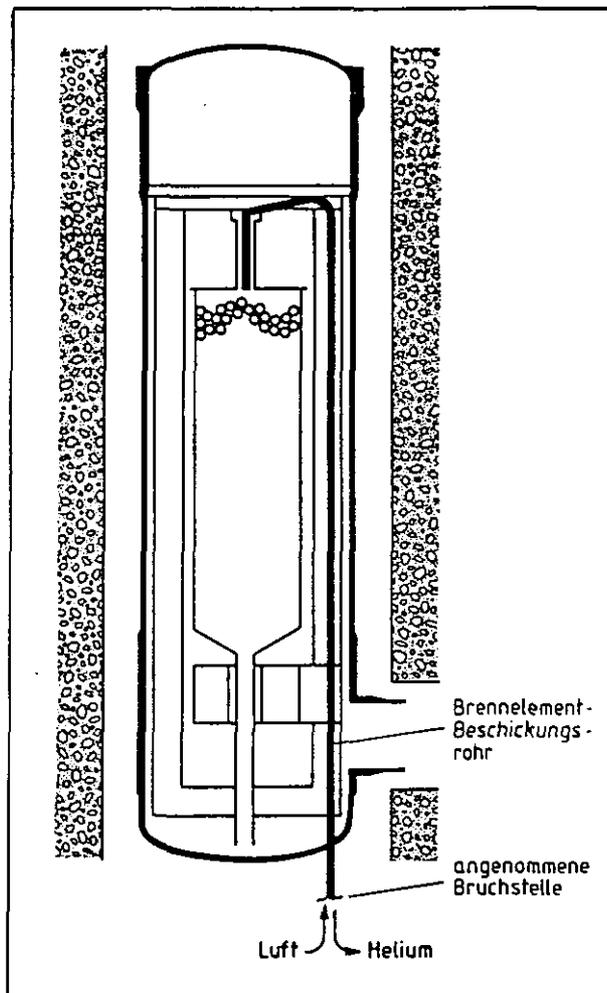


Abb. 1: HTR-Modul, angenommene Bruchstelle des Brennelementbeschickungsrohres

Die sich hier stellende Frage ist nun, auf welche Art und Weise und wie schnell nach Abschluß der Druckentlastung das im PK befindliche Resthelium sich gegen die Luft bzw. das Gasgemisch des RSG austauscht. Im hier geschilderten Fall hat man es mit einer nach unten orientierten, tief liegenden Lecköffnung zu tun. Gasversorgungsleitungen bis NW65, die an den PK anschließen, sind ebenfalls als postulierte Leckstellen von Bedeutung. In diesem Zusammenhang ergibt sich die Aufgabe, den Gasaustausch über Rohrstrecken mit beliebiger Orientierung des Rohres zur Horizontalen zu untersuchen.

Bei HTR mit Spannbetonbehältern wurden Lecks an den Abschlüssen von Dampferzeugerkavernen postuliert /3/. Für die recht massiven Abschlußstopfen wurde der hypothetische Fall diskutiert, daß die

Dichtung über den gesamten Umfang aufreißt, so daß - der Stopfen selbst kann aus konstruktiven Gründen nicht herausgeschleudert werden (s. Abb. 2) - ein ringspaltförmiges Leck entsteht. Über den Ringspalt werden sich im Anschluß an die Druckentlastung Gasaus-tauschvorgänge vollziehen.

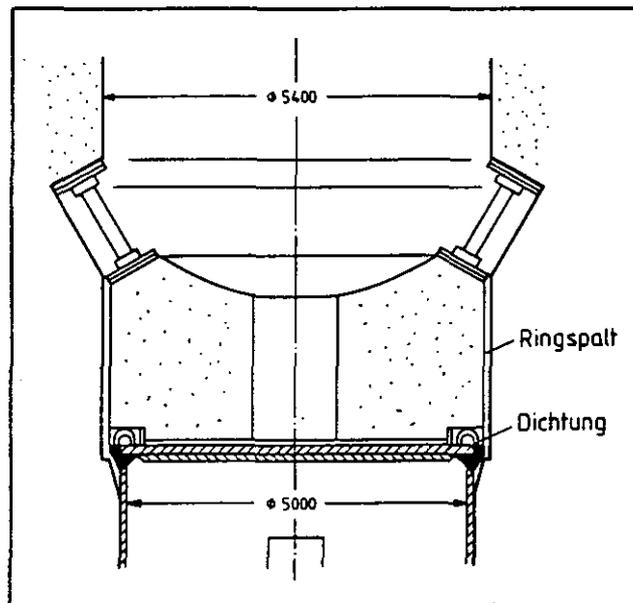


Abb. 2: Abschlußstopfen einer Dampferzeugerkaverne eines Spannbetonbehälters

Als extrem hypothetischer Grenzfall ist auch der Austausch über den gesamten Kavernenquerschnitt bei fehlendem Abschlußstopfen für Maximalabschätzungen des möglichen Lufteinbruchs von einem gewissen Interesse.

3. DIE PHASEN NACH DEM AUFTRETEN VON LECKS

Nach dem Auftreten eines Lecks in der druckführenden Umschließung entlastet sich der PK in einer ersten relativ schnell ablaufenden Phase. In dieser Phase kommt es über die Leckstrecke zu einem Gas-transport in einer Richtung, nämlich vom PK zum RSG. Nach der Entlastung schließt sich eine längerfristige Phase mit Gasaus-

tauschvorgängen an, die mit dem Gastransport in zwei entgegengesetzten Richtungen verbunden sind.

3.1 Druckentlastung

In Abb. 3 ist schematisch die Phase der Druckentlastung angedeutet.

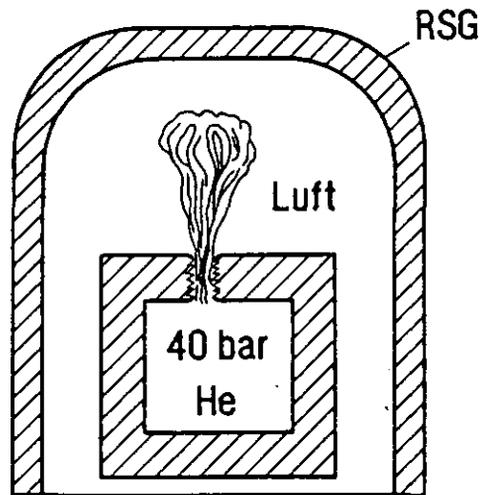


Abb. 3: Druckentlastungsphase

Unter der Voraussetzung einer isothermen Expansion sowie einer Vernachlässigung von Strömungswiderständen läßt sich die folgende Differentialgleichung für die Dichte ρ des Heliums im PK anschreiben. Der Einfachheit halber wird mit einem Temperaturmittelwert des Heliums über den Primärkreislauf gerechnet. Ebenfalls ist bei der Ableitung von Gl. (1) angenommen worden, daß im Abströmquerschnitt stets der kritische Temperatur- und Druckzustand herrscht und der Ausstrom demgemäß unabhängig vom RSG-Druck ist. Dies ist praktisch fast während des gesamten Abströmvorganges der Fall.

$$(1) \quad \frac{d\rho}{dt} = -\frac{F}{M} \sqrt{\frac{\gamma P_0^2}{RT_0} \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}} \rho$$

Hierbei bedeuten:

T_0 : mittlere Temperatur des Heliums (als konstant während der Druckentlastung angenommen) [K]

P_0 : Anfangsdruck des Heliums [Pa]

$\gamma = c_p/c_v$: Verhältnis der spez. Wärme bei konstantem Druck zur spez. Wärme bei const. Volumen [-] (5/3 für He).

M : Anfangsgesamtmasse des Heliums [kg]

F : Leckquerschnittsfläche [m²]

R : Gaskonstante, für He = 2077,2 [J/(kg K)]

Die Lösung von (1) ist durch eine Exponentialfunktion gegeben.

$$(2) \quad \rho = \rho_0 e^{-\frac{t}{\tau}} \quad \text{mit} \quad \frac{1}{\tau} = \frac{F}{M} \sqrt{\frac{\gamma P_0^2}{RT} \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}}$$

Typische Zustände innerhalb des Primärkreislaufs eines Hochtemperaturreaktors sind charakterisiert durch die folgenden Werte:

$$T_0 = 625 \text{ K}, \quad P_0 = 4 \text{ MPa}, \quad M = 10.000 \text{ kg.}$$

Damit erhält man für τ :

$$(3) \quad \tau \approx \frac{4}{F[\text{m}^2]} [\text{sec}]$$

Ein gebrochenes NW65 Rohr bietet z.B. einen Leckquerschnitt von etwa 33 cm² = 0,0033 m², womit sich die charakteristische Zeit τ zu $\tau = 1212 \text{ sec} \approx 20 \text{ Minuten}$ ergibt.

3.2 Gasaustauschvorgänge nach Druckausgleich

Nach Abschluß der Druckentlastung kommt es zu Gasaustauschvorgängen. Je nach Lage und Orientierung des Lecks sind verschiedene Mechanismen für diese Vorgänge verantwortlich. Die Abb. 4 zeigt schematisch die Situation.

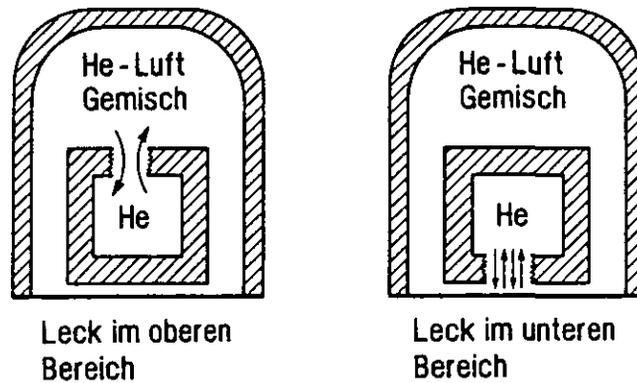


Abb. 4: Gasaustausch nach Druckentlastung

Befindet sich z.B. das Leck im oberen Bereich und ist der Leckquerschnitt nach oben orientiert, so liegt unmittelbar nach der Druckentlastung ein mechanisch instabiler Zustand vor. Das im PK verbliebene Resthelium ist spezifisch leichter als das Gas bzw. Gasgemisch im RSG. Das Helium wird demgemäß nach oben aufsteigen, während das schwerere RSG-Gas in den PK einfallen wird. Entsprechend der Orientierung und Lage des Lecks wird im erwähnten Falle der Gasaustausch durch Konvektion kontrolliert. Solange im PK spezifisch leichtes Gas ist, finden Strömungsvorgänge über die Leckstrecke statt. Im übrigen kann sich natürlich auch die Konvektion nach dem Austausch des PK-Heliums fortsetzen. Solange das im Primärkreis befindliche Gas wärmer ist als die RSG-Atmosphäre, muß mit Strömungsvorgängen über die Leckstrecke gerechnet werden. Diese Tatsache kann große Bedeutung haben, wenn man das Langzeitverhalten eines druckentlasteten Reaktors unter der Bedingung untersucht, daß das Leck nicht verschlossen wird.

Befindet sich beispielsweise ein Leck im unteren Bereich des Reaktors, wie es in der Abb. 4 angedeutet ist, so liegt eine grundsätzlich andere Situation vor. Das System ist aus mechanischer Sicht stabil. Das Resthelium des Primärkreises wird wie unter einer 'Glocke' gehalten. Konvektive Effekte der eben beschriebenen Art treten hierbei nicht auf. Gasaustausch kann nur über Diffusion erfolgen, wobei Helium und Luft sich einander durchsetzen. Solche Vorgänge sind verglichen mit konvektiven Abläufen relativ langsam.

Sowohl die konvektions- als auch die diffusionskontrollierten Austauschvorgänge werden überlagert von dem sogen. Atmen des Primärkreises. Hierunter ist zu verstehen, daß durch Temperaturänderungen innerhalb des Primärkreises Gas ausgeschoben (bei Aufheizung) bzw. eingesaugt (bei Abkühlung) wird. Dieser 'Atemeffekt' ist vor allem im Zusammenhang mit diffusionskontrollierten Leckstrecken von Bedeutung. Unter Umständen kann es durch das Atmen zu so hohen Strömungsgeschwindigkeiten in der Leckstrecke kommen, daß Diffusionsvorgänge nur noch von untergeordneter Bedeutung sind /2/,/4/.

4. EINFACHE THEORETISCHE RECHENMODELLE

Selbst bei einfacher Geometrie des Lecks und der sich anschließenden Austauschstrecke ist vor allem der konvektiv kontrollierte Gasaustausch nur schwer in den Griff zu bekommen. Im folgenden werden für einfache Leckstrecken einfache Modelle und Berechnungsgrundlagen angegeben. Es soll hier an dieser Stelle erwähnt werden, daß man mit Hilfe der gegebenen Formeln sich lediglich einen rohen Anhaltswert verschaffen kann, der unter Umständen noch nicht einmal in der Größenordnung des wirklich in der Natur auftretenden Wertes liegt. Allerdings ist es so, daß die mit den einfachen Formeln ermittelten Werte im allgemeinen konservativ sind, so daß also die wirklichen Austauschraten kleiner sind als gerechnete Ergebnisse.

4.1 Rechenmodell für konvektiven Austausch

Im folgenden wird ein einfaches Modell zur Beschreibung der konvektiv bedingten Austauschvorgänge dargestellt /5/,/3/. Zwei Reservoirs (A und B) auf unterschiedlicher Höhe seien mit einem leichten (z.B. Helium) und einem schweren Fluid (z.B. Luft) gefüllt, wobei der untere Behälter das leichtere enthalte (s. Abb. 5).

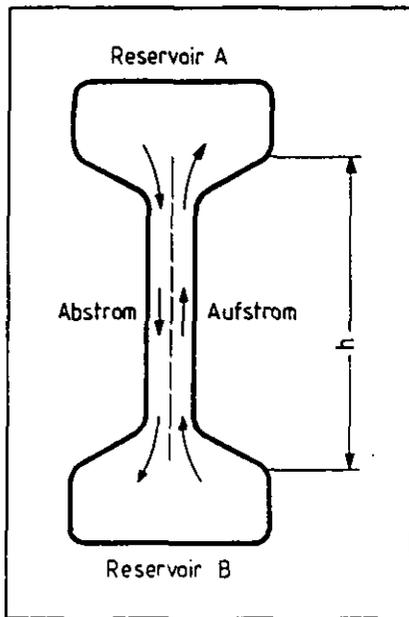


Abb. 5: Konvektiver Austausch einer leichten Fluidkomponente B und einer schweren Komponente A. Der Verbindungskanal wird in räumlich feste Bereiche für Auf- und Abstrom eingeteilt.

Wenn nun die Reservoire untereinander verbunden sind, so zeigt das leichte Fluid die Tendenz, nach oben zu steigen. Es werden Aufwärts- und Abwärtsströmungen einsetzen. Wenn die Fluide nicht mischbar sind, wird man nach einer gewissen Zeit die schwere Komponente unten finden, so daß sich die Anfangsverhältnisse umgekehrt haben. Bei mischbaren Fluiden wie Gasen ist die Endsituation ein homogen durchmischtes Fluid in beiden Reservoiren.

Die folgenden Betrachtungen gehen von mischbaren Fluiden aus. Die einfachste Hypothese ist hier, zu jeder Zeit in beiden Reservoiren eine vollständige Durchmischung anzunehmen. Wenn also aus Reservoir A oder B ein Quantum in den jeweils anderen Behälter gelangt, so wird vorausgesetzt, daß es sich augenblicklich über das gesamte Behältervolumen gleichmäßig verteilt.

Wenn das Verbindungsstück der Reservoire, so wie es im Experiment der Fall war, einen zusammenhängenden Querschnitt hat, so wird diese Querschnittsfläche F in zwei gleich große zusammenhängende Teile für Abwärts- und Aufwärtsströmung eingeteilt (s. Abb. 5).

Durch die folgenden Bilanzgleichungen für Masse und mechanische Energie wird der Strömungsvorgang in einfacher Form beschrieben. Es wird vorausgesetzt, daß die Strömung quasistationär ist und daß die zeitliche Änderung der kinetischen und potentiellen Energie des Gesamtvolumens vernachlässigt werden kann. Alle mit dem In-

Index A versehenen Größen beziehen sich auf Reservoir A, während Index B alle auf Reservoir B bezogenen Größen ausdrückt.

Massenbilanz:

$$(4) \quad V_A \frac{d\rho_A}{dt} = -\frac{F}{2}(\rho_A - \rho_B)v$$

$$(5) \quad V_B \frac{d\rho_B}{dt} = -\frac{F}{2}(\rho_B - \rho_A)v$$

mit

V_A, V_B = Volumen der Reservoir A, B [m^3]
 ρ_A, ρ_B = Mittlere Dichte der Luft bzw. des Heliums [kg/m^3]
 F = Leckquerschnittsfläche [m^2]
 v = Gasgeschwindigkeit [m/s]

Unter der Voraussetzung inkompressibler Medien sowie gleich großer Flächen für Auf- und Abstrom ist die Gasgeschwindigkeit in beiden Zonen gleich.

Aus der Bilanzgleichung für mechanische Energie folgen Beziehungen zwischen Drücken, Dichten und der Geschwindigkeit für Auf- und Abstrom.

Mechanische Energiebilanz:

$$(6) \quad P_B = P_A + \rho_A gh - \xi_A \frac{\rho_A v^2}{2}$$

$$(7) \quad P_B = P_A + \rho_B gh - \xi_B \frac{\rho_B v^2}{2}$$

mit:

P_A, P_B = Statischer Druck der Reservoir A, B. [N/m^2]
 h = Höhe der Austauschstrecke [m]

Die Widerstandsbeiwerte ξ_A und ξ_B berücksichtigen sowohl Ein- und Austrittsverluste als auch den Reibungsverlust in der Austauschstrecke, die die beiden Reservoir verbindet.

Der Reibungsverlust wird durch den Ausdruck $\lambda \cdot h/d_{\text{hyd}}$ beschrieben, wobei aus den geometrischen Abmessungen der halben Leckquerschnittsfläche ein hydraulischer Durchmesser gebildet wird, wie es in der Hydraulik üblich ist: $d_{\text{hydr}} = 4 \times \text{Fläche} / \text{benetzter Umfang}$; der Reibungsparameter λ ist eine Funktion der Reynoldszahl und berechnet sich bei laminarer Strömung aus

$$(8) \lambda = \frac{64}{Re}$$

und bei turbulenter Strömung aus

$$(9) \lambda = \frac{0,3164}{Re^{0,25}}$$

Der hydraulische Durchmesser d_{hyd} ist streng genommen nur zur Berechnung turbulenter Strömungsvorgänge anwendbar. Hier soll er jedoch auch zur Berechnung laminarer Strömungen benutzt werden, da das beschriebene Rechenmodell lediglich für Abschätzungen verwendet wird.

Am Ein- und Austritt der Austauschstrecke entstehen zusätzliche Strömungsverluste, die man in der Summe über einen Verlustbeiwert $\xi_{E+A} = 2,5$ schätzungsweise erfassen kann /7/. Somit kann man für ξ insgesamt ansetzen

$$(10) \xi = \lambda \frac{h}{d_{hyd}} + 2,5$$

Aus (6) und (7) erhält man die Geschwindigkeit, die gemäß Voraussetzung sowohl für den Auf- als auch für den Abstrom gilt:

$$(11) v = \sqrt{\frac{(\rho_A - \rho_B)2gh}{\xi_A \rho_A + \xi_B \rho_B}}$$

Die mit dem Austausch verbundenen Flußgrößen lassen sich mit Hilfe von Gl. (11) angeben. Der Nettomassenstrom \dot{M} ist gegeben durch die Differenz des abströmenden und des aufströmenden Massenstromes:

$$(12) \dot{M} = \frac{F}{2} (\rho_A - \rho_B) v = \frac{F}{2} \sqrt{\frac{(\rho_A - \rho_B)^3 2gh}{\xi_A \rho_A + \xi_B \rho_B}}$$

Ist man an der Rate \dot{E} des eindringenden Fluids (Eintrittsrates) interessiert (z.B. für Abschätzungen von Lufteinbruchsraten), so hat man zu bilden

$$(13) \dot{E} = \frac{F}{2} \rho_A v = \frac{F}{2} \sqrt{\frac{(\rho_A - \rho_B) \rho_A^2 2gh}{\xi_A \rho_A + \xi_B \rho_B}}$$

Will man unter den zu Beginn erwähnten Vereinfachungen den zeitlichen Verlauf der Dichten in den beiden Reservoiren errechnen, so hat man die Geschwindigkeit v nach Gl. (11) in Gleichung (4) und

(5) einzusetzen. Man erhält dann die beiden folgenden gekoppelten Differentialgleichungen:

$$(14) \quad \frac{d\rho_A}{dt} = -\frac{F}{2V_A} \sqrt{\frac{(\rho_A - \rho_B)^3 2gh}{\xi_{A\rho_A} + \xi_{B\rho_B}}}$$

$$(15) \quad \frac{d\rho_B}{dt} = -\frac{F}{2V_B} \sqrt{\frac{(\rho_A - \rho_B)^3 2gh}{\xi_{A\rho_A} + \xi_{B\rho_B}}}$$

Die Gleichungen (7a, b) lassen sich einfach numerisch lösen. Bezeichnet man mit $\rho_{A,i}$, $\rho_{B,i}$ die Dichten zum i -ten Zeitpunkt, so gilt für ρ_A , ρ_B zur Zeit $t_{i+1} = t_i + \Delta t$:

$$(16) \quad \rho_{A,i+1} = \rho_{A,i} - \frac{\Delta t F}{2V_A} \sqrt{\frac{(\rho_{A,i} - \rho_{B,i})^3 2gh}{\xi_{A,i}\rho_{A,i} + \xi_{B,i}\rho_{B,i}}}$$

$$(17) \quad \rho_{B,i+1} = \rho_{B,i} - \frac{\Delta t F}{2V_B} \sqrt{\frac{(\rho_{A,i} - \rho_{B,i})^3 2gh}{\xi_{A,i}\rho_{A,i} + \xi_{B,i}\rho_{B,i}}}$$

Es ist recht instruktiv, die mit Gl. (14,15) bzw. Gl. (16,17) erhaltenen Rechenergebnisse an einem kleinen, wenig aufwendigen Experiment zu überprüfen. Eine 5 l Flasche wurde mit Helium gefüllt auf eine empfindliche Waage gesetzt und dann im offenen Zustand sich selbst überlassen (s. Abb. 6).

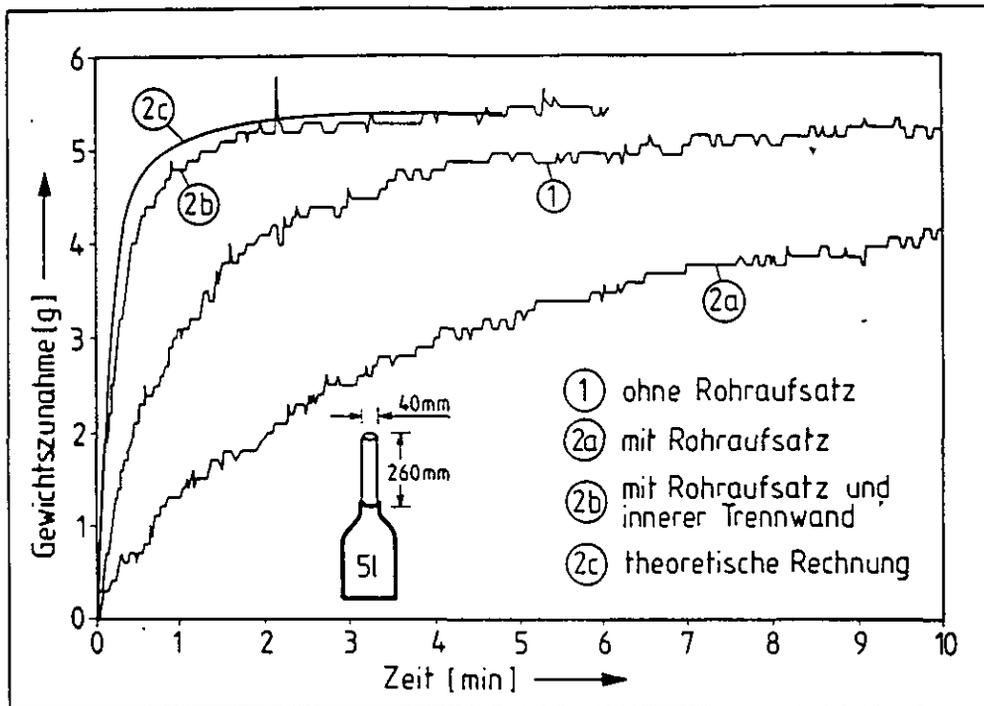


Abb. 6: Austausch von Helium und Luft unter verschiedenen Randbedingungen

Das leichte Helium entwich nach oben, während schwere Luft in die Flasche eindrang. Das Gesamtgewicht nahm dadurch zu, bis diese vollständig mit Luft gefüllt war (s. Kurve 1 Abb. 6). Im Endzustand zeigte dann die Gewichtsanzeige über 5 g mehr als zu Versuchsbeginn an. Diese Differenz entspricht dem Gewichtsunterschied von 5 l Luft und 5 l Helium. Ein weiterer Versuch wurde mit einem Rohraufsatz als Austauschstrecke durchgeführt. Die Kurve 2a resultierte aus diesem Versuch. Man erkennt eine deutliche Verlangsamung des Austauschprozesses im Vergleich mit Kurve 1. Eine Sichtbarmachung der Strömungsverhältnisse in der Austauschstrecke mit Rauch zeigte hochturbulente Vorgänge, die durch das mehr oder weniger gleichzeitige Aufwärtsströmen von Helium und Abwärtsströmen von Luft erzeugt werden.

Schob man in das Rohr eine feste Trennwand ein, so lief der Austauschvorgang erheblich schneller ab (Kurve 2b). Eine Nachrechnung mit dem eben formulierten Rechenmodell ergab die Kurve 2c. Diesen kleinen Versuch sollte man sich vor Augen führen, wenn man vor der Aufgabe steht, die Gasaustauschraten über eine nach oben orientierte Rohrleitung zu untersuchen. Das hier entwickelte einfache

Rechenmodell entspricht mehr oder weniger dem Fall des Rohres mit eingeschobener Trennwand, wobei erheblich höhere Austauschraten auftreten als beim einfachen Rohr. Im Zusammenhang mit der Beschreibung von Versuchen in Abschnitt 5 wird noch näher darauf eingegangen.

4.2 Rechenmodell für Gasaustausch über Diffusion

Im folgenden wird ein einfaches Modell dargestellt, mit dem Diffusionsvorgänge über die Austauschstrecke beschrieben werden können.

Zwei Reservoirs (A und B) auf unterschiedlicher Höhe seien je mit einem schweren (z.B. Luft) und einem leichten Fluid (z.B. Helium) gefüllt, wobei sich das schwere Fluid im unteren Behälter befindet (s. Abb. 7). Sind nun die Reservoirs untereinander verbunden, so diffundiert im Laufe der Zeit das schwere Fluid in Reservoir A und das leichte in Reservoir B.

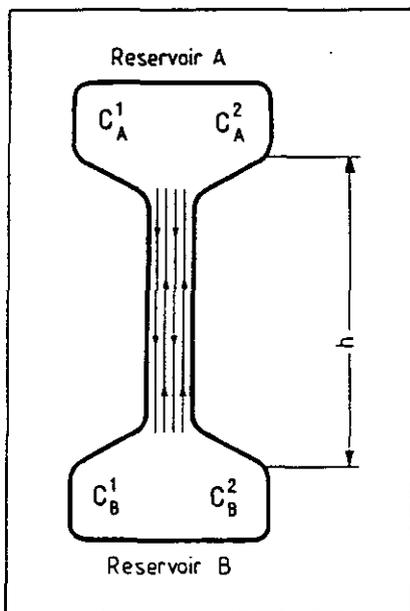


Abb. 7:

Diffusionsbedingter Austausch einer schweren Fluidkomponente und einer leichten Komponente

Sind nun die Reservoirs untereinander verbunden, so diffundiert im Laufe der Zeit das schwere Fluid in Reservoir A und das leichte in Reservoir B.

Unter der Voraussetzung einer stets vollständigen Durchmischung in beiden Reservoirs und quasistationärem Diffusionsverhalten gelten

für die zeitlich sich ändernden Konzentrationsverhältnisse folgende Differentialgleichungen:

$$(18) \quad V_A \frac{dC_A^1}{dt} = -DF \frac{C_A^1 - C_B^1}{h}$$

$$(19) \quad V_B \frac{dC_B^2}{dt} = -DF \frac{C_B^2 - C_A^2}{h}$$

mit:

V_A, V_B = Volumen der Reservoire A und B [m^3]

C_A^1, C_A^2 = Konzentration des Stoffes 1 bzw. 2 in Reservoir A [$kmol/m^3$]

C_B^1, C_B^2 = Konzentration des Stoffes 1 bzw. 2 in Reservoir B [$kmol/m^3$]

D = Diffusionskoeffizient [m^2/s]

F = Querschnittsfläche des Verbindungsstückes [m^2]

h = Höhendifferenz der Reservoire [m]

Die rechten Seiten der Gl. (18), (19) stellen die Flüsse über die Leckstrecke dar, während die linken Seiten die durch diese bewirkten Konzentrationsänderungen repräsentieren.

Bei Druckgleichheit in den beiden Reservoiren gilt für ideale Gase $C_A^1 + C_A^2 = C_B^1 + C_B^2 = C$, so daß man aus den Gleichungen (18) und (19) folgende gekoppelte Differentialgleichungen für C_A und C_B erhält:

$$(20) \quad \frac{dC_A^1}{dt} = -\frac{DF}{V_A h} (C_A^1 + C_B^2 - C)$$

$$(21) \quad \frac{dC_B^2}{dt} = -\frac{DF}{V_B h} (C_B^2 + C_A^1 - C)$$

Wenn das Reservoir B volumenmäßig sehr viel größer als Reservoir A ist, wird die Gesamtkonzentration C praktisch ausschließlich durch C_B^2 bestimmt: $C_B^2 = C$.

Aus Gleichung 18 ergibt sich dann:

$$(22) \quad \frac{dC_A^1}{dt} = -\frac{DF}{V_A h} C_A^1$$

Die Lösung dieser Differentialgleichung lautet:

$$(23) C_A^1(t) = C_{A0}^1 e^{\frac{-DF}{V_A n} t}$$

Dividiert man die letztgenannte Gleichung durch C , so erhält man die in Anteile ausgedrückte Konzentration des Stoffes 1 in Reservoir A.

4.3 'Atemeffekte'

Ein gasgefüllter Behälter mit Volumen V_B sei über eine Öffnung mit der Umgebung verbunden. Durch Änderung der Temperatur $T(t)$ innerhalb des Behälters sowie durch Druckänderungen in der Umgebung $p(t)$ (z.B. Luftdruckschwankungen oder durch Gebläse erzeugte Druckschwankungen, wenn der geöffnete Behälter in einer Halle steht!) kommt es zu einem Ausschleiben bzw. Einsaugen von Gas aus bzw. in den Behälter. Solche Vorgänge werden kurz als 'Atmen des Behälters' bezeichnet.

Der Volumenstrom des Gases ist durch folgende Beziehung gegeben:

$$(24) \dot{V} = -\frac{V_B}{T(t)} \frac{dT(t)}{dt} + \frac{V_B}{p(t)} \frac{dp(t)}{dt}$$

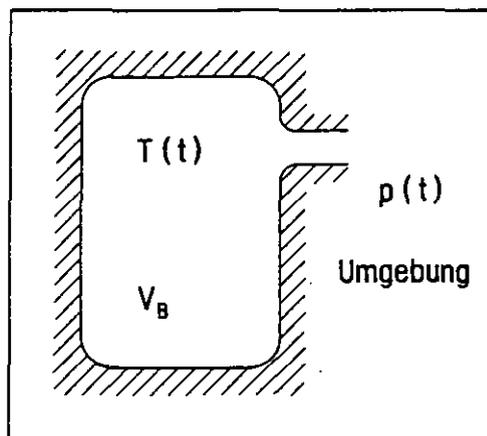


Abb. 8: Zur Umgebung offener Behälter V_B mit Gasfüllung der Temperatur $T(t)$; Umgebungsdruck $p(t)$

Unter $T(t)$ ist hierbei die absolute Temperatur (in Kelvin) zu verstehen. Das gemäß Gl. (24) definierte \dot{V} wird positiv, wenn Gas

eingesaugt wird. Das ist z.B. dann der Fall, wenn die Temperatur innerhalb des Behälters abnimmt oder wenn der äußere Umgebungsdruck ansteigt.

In /2/ wurde eine Situation genauer analysiert, wo sich Diffusionsvorgänge und das Atmen des Primärkreislaufs überlagern. Ein mit Helium gefüllter Behälter war in jenem Fall über eine lange nach unten weisende Rohrleitung mit der Umgebung verbunden. Die Beschreibung der Transportvorgänge innerhalb des Rohres erfolgte durch die folgende Differentialgleichung:

$$(25) \quad \frac{\partial C_{Lu}}{\partial t} = D_{He-Lu} \frac{\partial^2 C_{Lu}}{\partial x^2} - v \frac{\partial C_{Lu}}{\partial x}$$

C_{Lu} bezeichnet in Gl. (25) die Luftkonzentration [kmol/m³] entlang des Rohres. D_{He-Lu} ist der Diffusionskoeffizient des Helium-Luftgemisches (Näheres s. /2/). Die Größe v benennt die durch das 'Atmen des Behälters' bewirkte Gasgeschwindigkeit im Rohr, das eine Querschnittsfläche F_{Rohr} haben möge.

Für v gilt mit Hilfe von Gl. (24)

$$(26) \quad v = \frac{\dot{V}}{F_{Rohr}} = -\frac{V_B}{F_{Rohr} T} \frac{dT}{dt} + \frac{V_B}{F_{Rohr} p} \frac{dp}{dt}$$

Man kann nun zeigen, daß immer dann, wenn $v \gg D_{He-Lu}/L_{Rohr}$ ist (L_{Rohr} = Länge des Rohres), Diffusionsvorgänge keine Rolle mehr spielen. Gasaustausch ist in diesem Fall lediglich durch das 'Atmen des Behälters' bestimmt. Bei druckentlasteten HTR ist der Temperatureffekt in Gl. (24) entscheidend. In Fällen, in denen die Temperatur im Behälter zunimmt, wird Gas ausgeschoben, während bei Temperaturabnahme Gas eingesaugt wird. Unter HTR-spezifischen Bedingungen ist für NW65-Rohre die Gasgeschwindigkeit so groß, daß Diffusion der einen gegen die andere Gaskomponente von untergeordneter Bedeutung ist.

5. EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN

Um die mit den einfachen theoretischen Modellen errechneten Ergebnisse zu bewerten und einzuordnen, wurden Experimente durchgeführt.

Im einzelnen wurden Gasaustauschvorgänge über Rohrleitungen unter verschiedenen Neigungen, über ringspaltförmige Lecks, sowie über große nach oben orientierte Öffnungen durchgeführt. Eine Beschreibung der Versuchstechnik ist in /2/ zu finden.

5.1 Gasaustausch über Rohrleitungen

Im Zusammenhang mit Gasaustauschprozessen über Rohrleitungen wurden detaillierte Untersuchungen durchgeführt, um das Eindringen von Luft über eine gebrochene Brennelementbeschichtungsleitung abzuschätzen /2/. Weiterhin wurden Versuchsserien durchgeführt, bei denen Austauschraten über NW65-Rohrstücke bestimmt wurden, wobei die Rohrachse unter verschiedenen Winkeln zur Horizontalen geneigt war /8/.

5.1.1 Gasaustausch über eine lange nach unten gerichtete Rohrleitung

Im Rahmen von Auslegungsstörfällen wird der Bruch oder Abriß von Versorgungsleitungen des Primärkreislaufs bis hin zu Nennwerten NW65 unterstellt. Das Brennelementbeschickungsrohr des HTR-Modul fällt unter diese Versorgungsleitungen. Es ergab sich nun die Aufgabe zu untersuchen, mit welchen Lufteindringraten über ein gebrochenes Beschickungsrohr nach einer Druckentlastung zu rechnen ist. Die Situation ist in Abb. 1 (S. 4) dargestellt. Da im Experiment die Störfallbedingungen nicht genau analysiert werden konnten, ergab sich die Notwendigkeit begleitender theoretischer Analysen /2/, wie es in Abschn. 4.3 skizziert ist. Die experimentelle Anordnung ist in Abb. 9 dargestellt.

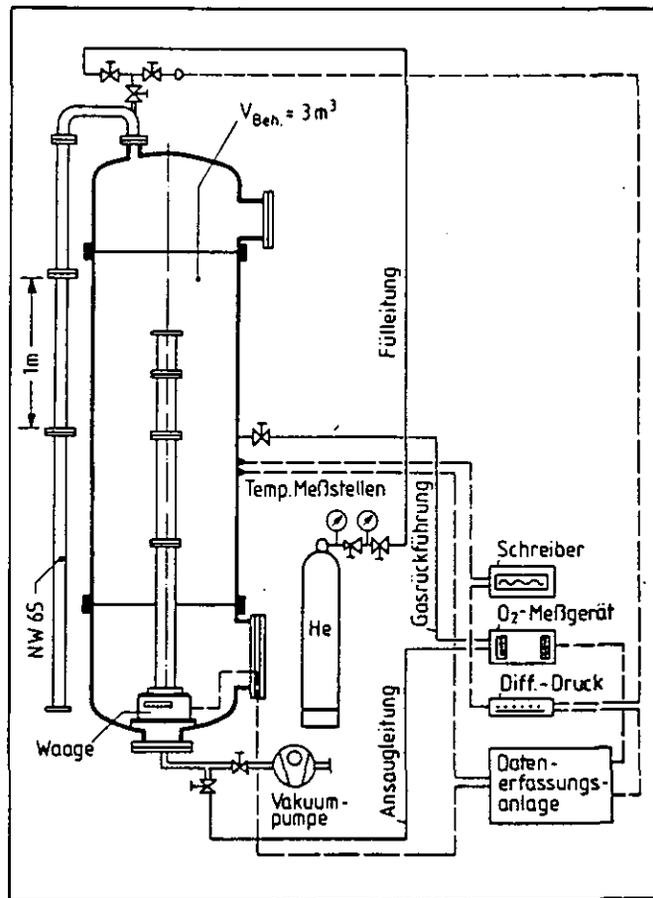


Abb. 9: Versuchsstand, gerüstet für Experiment zum Abriß Brennelementbeschickungsrohr

Die im Innern des zu Versuchsbeginn mit Helium gefüllten Behälters befindliche Säule diente der Messung der Gaskonzentration über Auftriebsänderungen.

Es zeigte sich in dem über drei Wochen laufenden Experiment, daß der Austausch von Helium und Luft ein langsamer Prozeß war, der sich recht gut über eine Gleichung der Form (25) beschreiben ließ. Die Abb. 10 zeigt das gemessene 1 und das gerechnete 2 Luftinventar bis zu rd. 500 h. Im Rahmen gewisser Unsicherheiten war die Übereinstimmung als befriedigend anzusehen. Kurve 3 zeigt Rechenergebnisse, in denen das 'Atmen des Behälters' nicht berücksichtigt worden ist. Unter dieser Bedingung ist allein Diffusion für den Austausch verantwortlich.

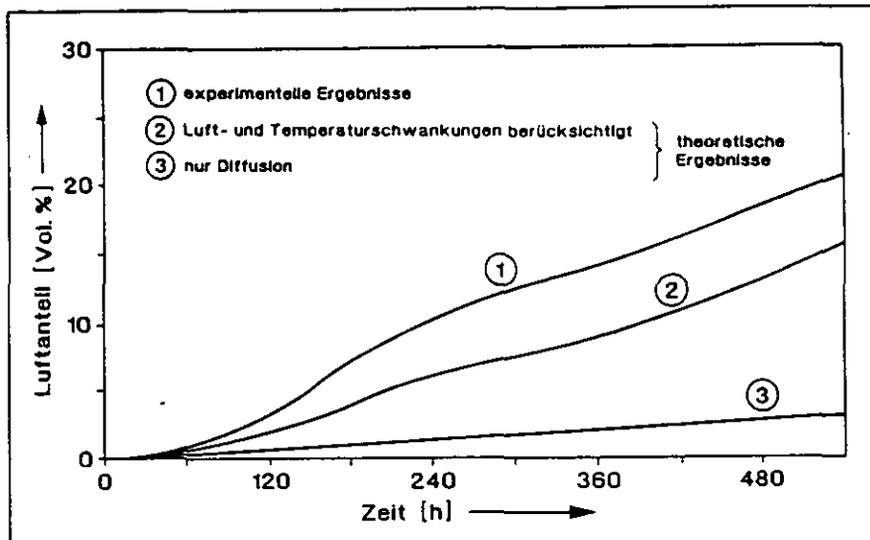


Abb. 10: Gasaustausch über senkrechte Rohrleitung, Vergleich Rechnung/Experiment

Das im gerade beschriebenen Versuch getestete Rechenmodell wurde auf die Situation des HTR-Modul nach Abriß des Brennelementbeschickungsrohres angewendet. Die rechnerische Analyse führte auf die in Abb. 11 dargestellte Kurve.

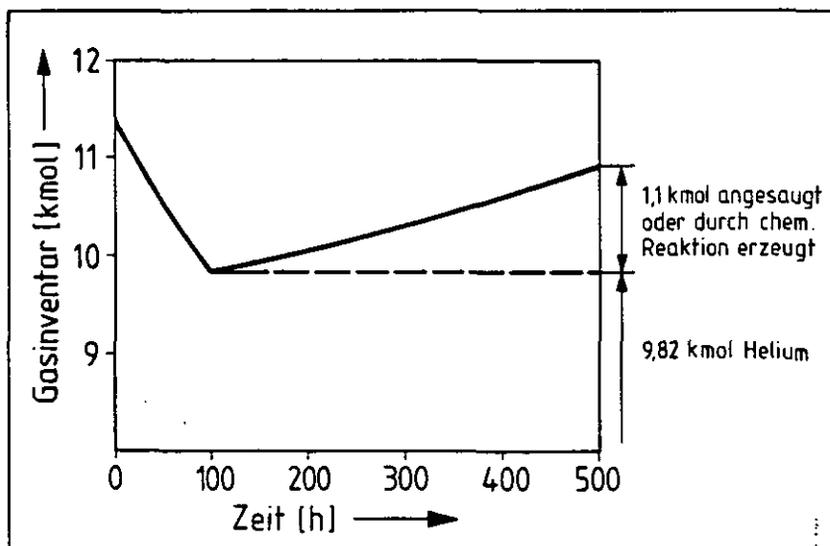


Abb. 11: Gasinventar im HTR-Modul

Während der ersten 100 h wird durch die Aufheizung des Primärkreislaufs Helium ausgeschoben, ohne daß aus der Umgebung etwas einzudringen vermag. Im Anschluß an die Aufheizphase erfolgt eine langsame, langfristige Abkühlung des Gases im Primärkreis, während der Gas (Luft) eingesaugt wird. Die eingesaugte Luftmenge ist sehr klein, so daß maximal 4-5 kg Graphit (von über 100 t!) in CO bzw. CO₂ umgesetzt werden.

5.1.2 Gasaustausch über Rohrstücke unterschiedlicher Neigung

Für 1 m lange NW65 Rohrstücke wurden Austauschvorgänge für unterschiedliche Neigungswinkel der Rohrachse zur Horizontalen untersucht. Die Abb. 12 zeigt die Ergebnisse.

Die Abszisse ist ein Maß für das Heliuminventar im Behälter. Am schnellsten ging der Austausch vonstatten, wenn die Rohrachse etwa $\alpha = 10^\circ$ aus der waagerechten nach oben geneigt war. Über ein senkrecht nach oben weisendes Rohr ($\alpha = 90^\circ$) vollzieht sich der Austausch langsamer als über das genau waagrecht positionierte Rohr ($\alpha = 0^\circ$).

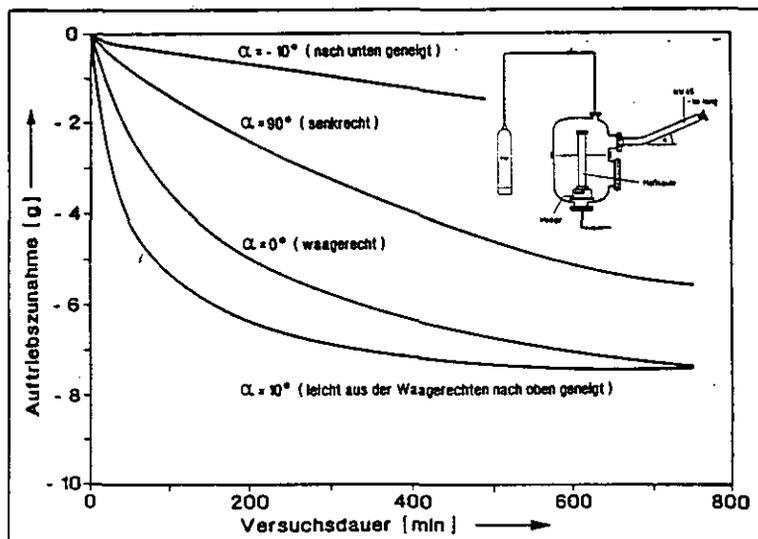


Abb. 12: Gasaustausch über Rohrleitungen; aufgetragen ist der infolge des Eindringens von Luft zunehmende Auftrieb der Meßsäule. Der Wert 0 entspricht reinem Helium, der Wert -7,29 entspricht reiner Luft im Behälter.

Dies steht im Gegensatz zu den Ergebnissen, die mit dem einfachen theoretischen Rechenmodell nach Abschnitt 4.1 erzielt werden /8/. In diesem Abschnitt sind im übrigen ja auch schon die Gründe diskutiert worden, warum Überschätzungen auftreten. Bei Benutzung des einfachen Modells errechnet man für die senkrecht stehende Rohrleitung die höchsten Austauschraten. Für $\alpha = 90^\circ$ werden in der Anfangsphase des Austauschvorganges die Raten um fast einen Faktor 100 überschätzt. Ein Sichtbarmachen der Strömungsverhältnisse im Rohr zeigte hochturbulente Vorgänge erzeugt durch das gleichzeitige Einfallen von Luft und Aufwärtsströmen von Helium, wie es auch bei dem einfachen Versuch der Fall war, der in Abschn. 4.1 beschrieben worden ist.

Für den Versuch, bei dem die Rohrachse um 10° nach oben geneigt war, war die Übereinstimmung von Rechnung und Experiment erheblich besser. Die errechneten Austauschraten in der Anfangsphase des Versuchs überschätzen hier 'nur noch' um einen Faktor 4-5. Eine visuelle Untersuchung der Strömungsverhältnisse erbrachte das in Abb. 13 gezeigte Bild.

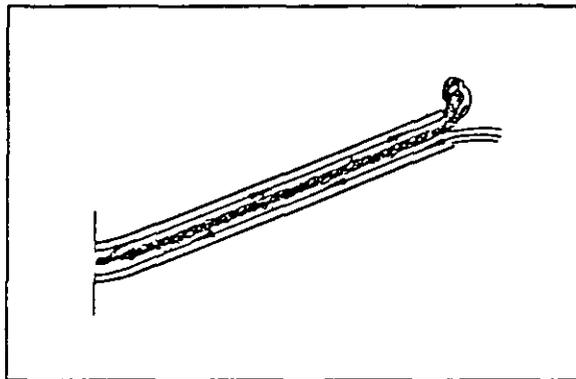


Abb. 13: Strömungsverhältnisse beim Gasaustausch für die unter 10° nach oben geneigte Rohrleitung

Es formierten sich zwei getrennte Bereiche im Rohrquerschnitt für Aus- und Einstrom. Turbulenzen erstreckten sich nicht über den gesamten Querschnitt, sondern blieben auf dem Bereich der 'Grenzschicht' zwischen Ein- und Ausstrom beschränkt. Der Blick auf die Strömungssituation macht auch deutlich, warum hier ein höherer Grad von Übereinstimmung zwischen Modell und Realität besteht. Das Modell geht ja von einer fiktiven Trennwand in der Austauschstrecke aus, die eindeutige Bereiche für Ein- und Ausstrom festlegt. Die Strömungsverhältnisse der Abb. 12 zeigen, daß auch in der Realität eindeutig Bereiche für Ein- und Ausstrom auftraten, die durch eine turbulente Grenzschicht als 'Trennwand' separiert waren. Eine Vergrößerung des Neigungswinkels ließ die Dicke des turbulenten Grenzbereichs mehr und mehr anwachsen, bis er schließlich bei Winkeln von $30^\circ - 40^\circ$ den gesamten Rohrquerschnitt erfüllte /8/. So erniedrigten sich die Austauschraten trotz des Anstiegs des treibenden Druckgefälles mit der größer werdenden Neigung.

Ein Ergebnis für einen nach unten gerichteten Neigungswinkel zeigt die Kurve $\alpha = -10^\circ$ der Abb. 12.

In diesem Fall sind zwar die Bedingungen für konvektiven Austausch der oben beschriebenen Art nicht gegeben, so daß Diffusion und eventuell Atmen des Behälters in Ansatz gebracht werden müssen. Diesbezüglich durchgeführte rechnerische Analysen unterschätzten aber die Austauschraten um einiges. Der Grund der Überschätzung wird aus Abb. 14 deutlich.

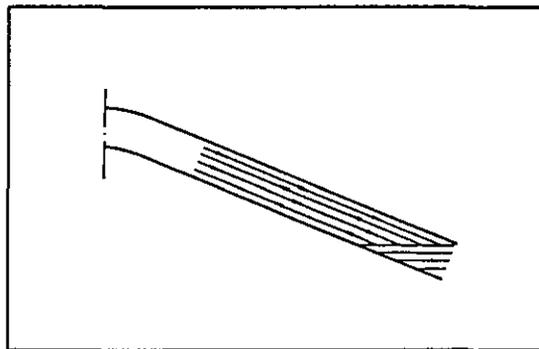


Abb. 14: Keilbildung am Rohrende bei diffusiven Gasaustauschvorgängen

In der mäßig geneigten Rohrleitung bildet sich ein Luftkeil aus, der zu einer wesentlichen Vergrößerung der Diffusionsfläche und zu

einer Verkürzung der Diffusionswege führt. Im einfachen Diffusionsmodell nach Abschn. 4.2 ist ein solcher Effekt nicht berücksichtigt.

5.2 Gasaustausch über ringspaltförmige Lecks

Versuche zum Gasaustausch durch ein ringspaltförmiges Leck wurden unter verschiedenen Randbedingungen durchgeführt. Der Ringspalt wurde durch Einhängen eines Stopfens ($\phi \sim 1 \text{ m}$) in den oben offenen Versuchsbehälter gebildet. Die Spaltweite betrug 21 mm (s. Abb. 15).

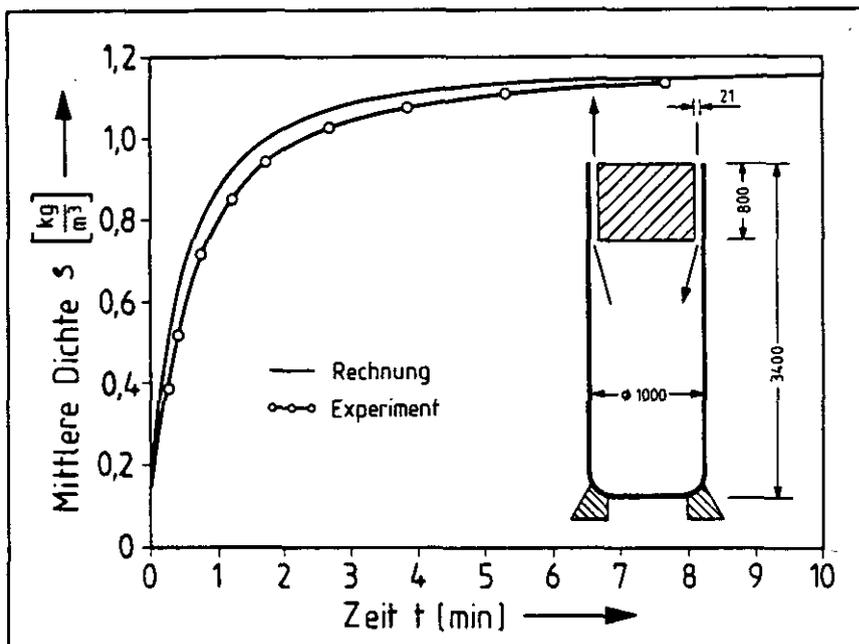


Abb. 15: Austausch über ein ringspaltförmiges Leck, Vergleich Rechnung/Experiment (mittlere Dichte der Behälteratmosphäre über der Zeit)

Variiert wurden bei den Versuchen die Stopfenlänge (von 0,1-1 m), der Leckquerschnitt durch Verstopfen von Teilbereichen des Ringspalts sowie die Länge der als Auftriebskörper dienenden Plexiglassäule, die zur Messung der mittleren Gasdichte in den Behälter eingebracht war.

Jeweils bei Versuchsbeginn war der Behälter mit Helium gefüllt und mit einem Deckel verschlossen. Nach dem Entfernen des Deckels setzte der Austausch Helium-Luft ein, wobei der Auftriebsgewinn der Plexiglassäule als Maß für die eingedrungene Luft genommen wurde.

Es zeigte sich, daß entlang des Ringspalts deutlich Bereiche für Ein- und Ausstrom zu identifizieren waren (Nachweis mit Rauchgas). Sie formierten sich allerdings von Zeit zu Zeit neu, blieben also nicht in einem einmal festgelegten Bereich des Ringspalts.

Bei unverstopftem Ringspalt vollzog sich der Austausch sehr rasch. Nachrechnungen mit vereinfachten, auf geführten Strömungsmodellen basierenden Ansätzen (s. Abschnitt 4.1) überschätzten die Austauschraten nur wenig (Abb. 15). Die Ergebnisse beziehen sich auf einen 21 mm breiten Ringspalt bei 800 mm Stopfenlänge.

Bei den Versuchen mit dem teilweise zusammenhängend verstopften Ringspalt zeigte sich, daß theoretische und experimentelle Austauschzeiten um so weiter auseinanderlagen, je mehr vom Ringspaltquerschnitt verstopft war (s. Abb. 16).

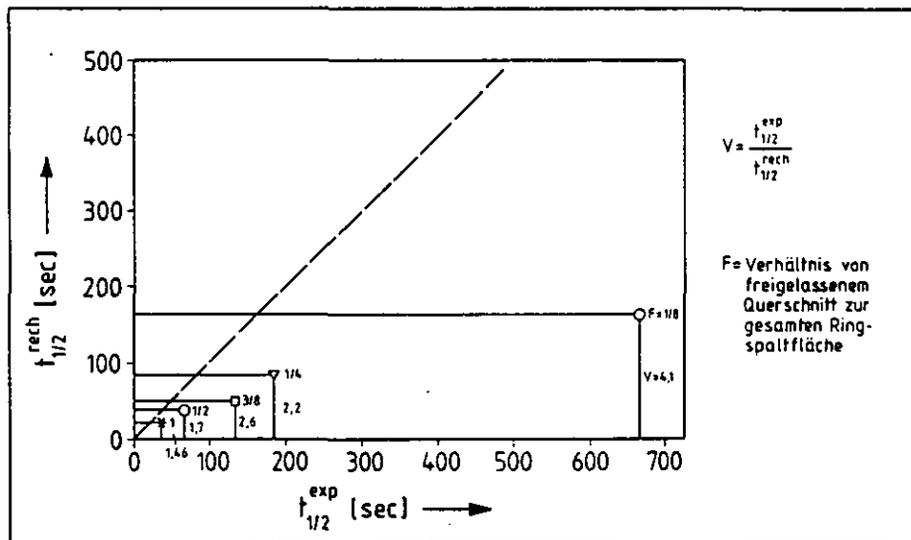


Abb. 16: Berechnete und experimentell ermittelte Zeit $t_{1/2}$ für 50 % Luftinventar im Behälter (Stopfenlänge 800 mm)

Wenn man den Ringspalt nicht zusammenhängend, sondern segmentiert verstopfte, ergab sich, daß der Austausch bei gleichem freien Leckquerschnitt erheblich rascher ablief. Dies ist darauf zurückzuführen, daß in den freien Querschnitten zwischen den verstopften Teilbereichen sich ortsfeste geführte Strömungen ausbilden konnten, die während des gesamten Versuchs stabil blieben.

Bei den Versuchen mit unterschiedlichen Stopfenlängen vollzog sich der Austausch bei langen Stopfen schneller als bei kurzen Stopfen. Die mit größer werdender Stopfenlänge wachsenden treibenden Druckdifferenzen entlang der Ausström- und der Einströmbereiche zeigen hier einen größeren Einfluß als die mit der Länge wachsenden Reibungskräfte (vergl. Kaminzug).

Gasaustauschversuche mit verschiedenen langen Plexiglassäulen als Auftriebskörper zeigten, daß erwartungsgemäß die größten Luftanteile im unteren Behälterbereich anzutreffen sind. Die gemessenen Auftriebskurven mit kurzer Plexiglassäule weisen starke Schwankungen auf, die auf die turbulenten Strömungsverhältnisse innerhalb des Behälters hindeuten.

Im Unterschied zu den Gasaustauschversuchen über Rohrstrecken kam es bei ringspaltförmigen Lecks zu besseren Übereinstimmungen von theoretischen und experimentellen Ergebnissen. Dies hängt damit zusammen, daß ein Ringspalt einen Leckquerschnitt mit stark unterschiedlichen Abmessungen darstellt (Spaltumfanglänge » Spaltweite). Innerhalb des Leckquerschnitts können sich somit relativ ungestörte Bereiche einstellen, in denen es zu Aus- bzw. Einströmen kommt. Turbulenzzonen an den Nahtstellen von Ein- und Ausströmbereichen bleiben begrenzt und breiten sich nicht, wie es bei kompakten Querschnitten (z.B. Rohrquerschnitten) der Fall sein kann, über die Gesamtfläche aus.

5.3 Gasaustausch über große Öffnungen

In /9/ wurden Untersuchungen zu Austauschraten über Rohrstücke mit einem Durchmesser/Höhe-Verhältnis von $D/H = 1/2,5$ durchgeführt. Hierbei sollte vor allem analysiert werden, welche Austauschraten bzw. Einbruchraten sich über die Rohrstücke einstellen, wenn oberhalb und unterhalb der Rohrstrecke Gasdichten herrschen, die der Umgebungsluftdichte ($\sim 20\text{ °C}$) und heißer Luft von 100 °C entsprechen. Die entsprechenden Dichteunterschiede wurden nicht thermisch erzeugt. Sie wurden im Versuch durch Verwendung geeigneter Helium-Stickstoff-Gemische simuliert. Gemessen wurde an 4 verschiedenen Rohrstücken mit jeweils $D = 0,1\text{ m}$, $D = 0,2\text{ m}$, $D = 0,3\text{ m}$ und $D = 0,4\text{ m}$ (bei $D/H = 2,5$) /8/.

Die Abb. 17 zeigt gerechnete (Formel (13)) und aus Messungen ermittelte Einbruchraten als Funktion des Rohrdurchmessers bei konstant gehaltenem D/H -Verhältnis.

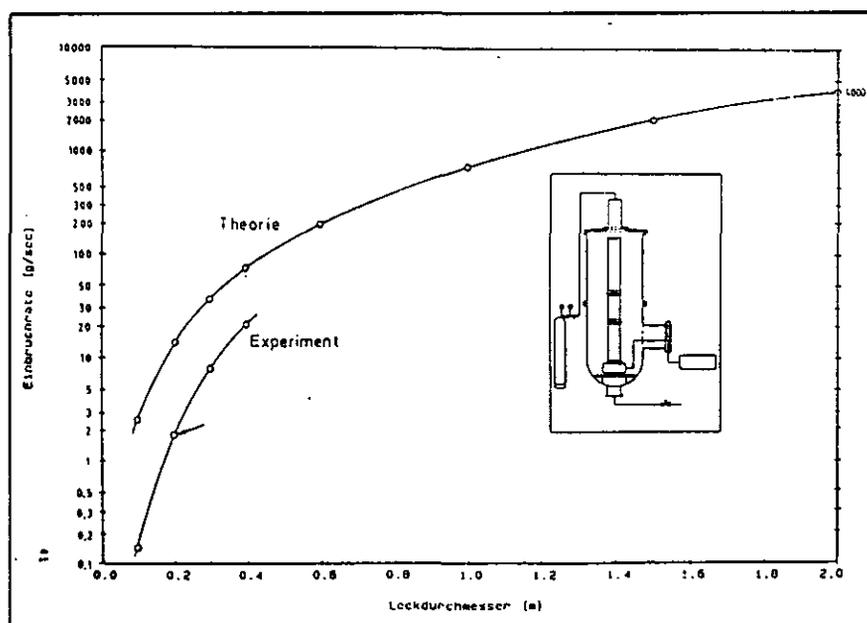


Abb. 17: Vergleich von theoretisch und experimentell ermittelter Lufteinbruchrate über den Leckdurchmesser bei einem h/d Verhältnis von 2,5 der Austauschstrecke und einer mittleren Dichte von $0,95\text{ g/dm}^3$.

In Abb. 18 ist das Verhältnis Rechnung/Experiment der Werte aus den in Abb. 17 dargestellten Kurven aufgezeichnet. Es ist recht deutlich zu erkennen, daß bei kleinen Durchmessern mehr als eine Größenordnung zwischen Experiment und Rechnung klaffen. Ein sol-

cher Sachverhalt wurde ja auch bei der Versuchsserie mit den NW65-Rohren festgestellt.

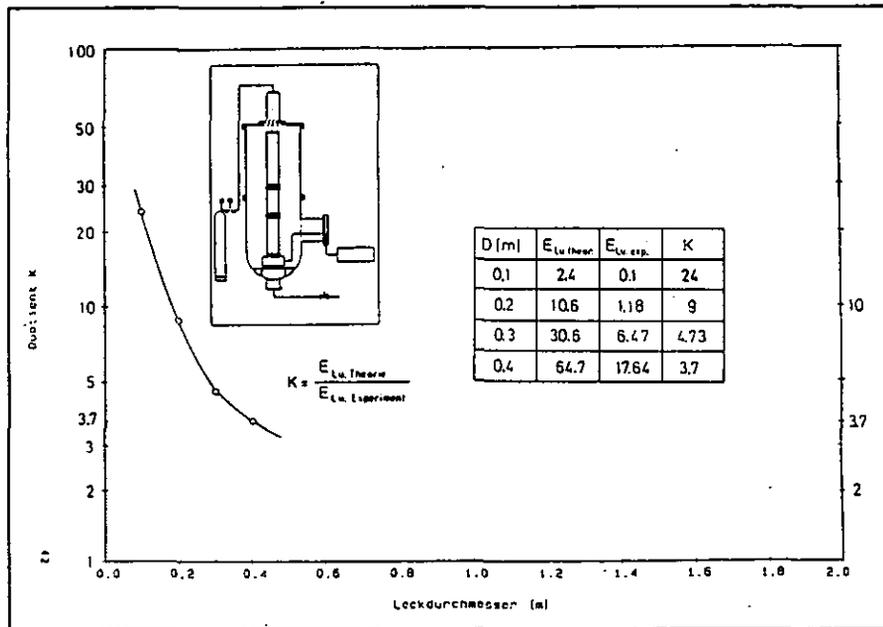


Abb. 18: Quotient K aus der theoretischen und experimentellen Einbruchrate der Luft bei einem h/d Verhältnis der Austauschstrecke von 2,5 und einer mittleren Dichte von $0,95 \text{ q/m}^2$.

Mit wachsendem Durchmesser nähern sich Rechnung und Experiment an, so daß bei großen Durchmessern im Bereich Meter gerechnete Werte höchstens noch um einen Faktor 2-3 überschätzen dürften.

Für eine 2 m - Öffnung, wie sie etwa bei Dampferzeugerkavernen in Spannbetonbehältern auftritt, ergeben sich mit den einfachen Rechenmodellen Einbruchraten von $\sim 4 \text{ m}^3/\text{sec}$ (s. Abb. 17). Mit Blick auf die Experimente würde man in der Realität mit Einbruchraten über $1 \text{ m}^3/\text{sec}$ rechnen müssen.

6. SCHLUSSBEMERKUNGEN

Gasaustauschvorgänge sind komplexe Phänomene. Die damit verbundenen Gasaustauschraten hängen stark von der Position und der geometrischen Konfiguration des Lecks ab. Beschränkt man sich bei Primärkreislauflecks auf Rohrbrüche (NW65), so dürften im allgemeinen Gasaustauschphänomene von untergeordneter Bedeutung sein. Zwar ergaben sich über leicht geneigte Rohre relativ hohe Austauschraten, man hat es aber andererseits konstruktiv in der Hand, solche Konfigurationen zu vermeiden, indem man Versorgungsleitungen von unten an den Primärkreislauf anschließt.

Es ist daher empfehlenswert, Gasaustauschvorgänge über das Atmen des Primärkreislaufs abzuschätzen (z.B. unter Verwendung von Formel (24)).

Bei hypothetischen Leckpostulaten wie Ausbildung ringspaltförmiger Lecks oder Versagen von Kavernenabschlüssen kann man für eine konservative Abschätzung von Lufteinbruchsraten auf Formel (13) zurückgreifen. Setzt man in dieser Relation $\xi = 2,5$, so erhält man als eine erste grobe konservative Abschätzung

$$\dot{E} = F \sqrt{\frac{\rho_A - \rho_B}{\rho_A + \rho_B} \frac{\rho_A^2 g h}{5}}$$

F ist die Leckquerschnittsfläche ρ_A die Dichte der Umgebungsluft, ρ_B die Dichte des primärkreisseitigen Gases unmittelbar am Eintritt in die Leckstrecke.

7. LITERATUR

- /1/ Teuchert, E.
Der Kugelhaufen-Hochtemperaturreaktor,
Physik in unserer Zeit, September 1983
- /2/ Breitbach, G.; David, H.P.; Nickel, M.; Wolters, J.
Gasaustausch zwischen einem Helium enthaltenden Behälter und
der Umgebung über ein nach unten abgehendes Rohr und dessen
Relevanz für den HTR-Modul
Jül-Spez-273, September 1984
- /3/ Wolters, J.; Altes, J.; David, P.H.; Pfeiffer, H.
Konvektiver Gasaustausch in einer ringförmigen Deckenöffnung
des Spannbetonbehälters von Hochtemperaturreaktoren.
Tagungsbericht Jahrestagung Kerntechnik 1980, Berlin 1980
- /4/ Breitbach, G.; David, P.H.; Lohnert, G.H.
Abschätzung des langfristigen Lufteintrags nach einem Druck-
entlastungsstörfall des HTR-Modul.
Tagungsbericht Jahrestagung Kerntechnik 1984, Frankfurt 1984
- /5/ Breitbach, G.; Nickel M.
Versuche zur Konvektion instabil geschichteter Flüssigkeiten
mit unterschiedlicher Dichte
KFA-ISF-IB-12/82, Interner Bericht, Oktober 1982
- /6/ Bird, R.B.; Stewart, W.E.; Tightfoot, E.N.
Transport Phenomena, Wiley New York, 1960
- /7/ VDI-Wärmeatlas
- /8/ Fernholz, E.
Experimentelle und theoretische Untersuchungen zum Gasaus-
tausch zwischen Luft und Helium über eine ringspaltförmige
Öffnung und Rohrleitungen
Interner Bericht KFA-ISF-IB-4/86, Juli 1986
- /9/ Wilke, T.
Gasaustausch zwischen einem Behälter und der Umgebung über
kreisförmige Lecköffnungen.
Interner Bericht KFA-ISF-IB-4/87, April 1987