



**Gesellschaft für Anlagen-  
und Reaktorsicherheit  
(GRS) mbH**

**Nachinertisierung  
eines Volldruck-  
Sicherheitsbehälters  
für den Fall ausle-  
gungsüberschreiten-  
der Ereignisse in  
DWR-Anlagen**

Eine Bestandsauf-  
nahme und erste  
Überlegungen



**Gesellschaft für Anlagen-  
und Reaktorsicherheit  
(GRS) mbH**

**Nachinertisierung eines  
Volldruck-Sicherheitsbe-  
hälters für den Fall aus-  
legungsüberschreitender  
Ereignisse in DWR-  
Anlagen**

Eine Bestandsaufnahme und  
erste Überlegungen

M. Tiltmann  
D. Risse  
P. Pana  
B. Hüttermann  
J. Rohde

Dezember 1993  
(Ursprünglicher Bericht  
vom April 1992)

**GRS - 103  
ISBN 3-923875-53-3**

## **Kurzfassung**

Die Zielsetzung dieses Berichtes bestand darin, die in verschiedenen Veröffentlichungen beschriebenen grundsätzlichen Überlegungen und Konzepte zum Thema "Nachinertisierung von Volldrucksicherheitsbehältern" zusammenfassend darzustellen. Weiterhin sollten offensichtliche Vor- und Nachteile einzelner Strategien sowie die Anforderungen aus Erkenntnissen zu möglichen Störfallabläufen an ein derartiges Konzept aufgezeigt werden.

Abschätzende Berechnungen zur Inertgaseinspeisung in den Sicherheitsbehälter im Verlaufe von Störfällen ergaben zusätzlich Hinweise auf z. B. erforderliche Mengen an Inertgasen, Einspeiseraten und resultierende Druckverläufe im Sicherheitsbehälter. Hierdurch wurden Einschätzungen zur Effektivität und Durchführbarkeit derartiger Maßnahmen möglich.

Aus der Vielzahl verschiedenartiger erster Schlußfolgerungen seien zwei wesentliche herausgegriffen:

- die technische Realisierung einer Nachinertisierung ist grundsätzlich möglich, dadurch können Wasserstoff-Verbrennungen im Sicherheitsbehälter verhindert werden.
- Eine Nachinertisierung ist nicht unabhängig von der Unfallentwicklung zu realisieren. Eindeutige Kriterien für die Durchführung einer derartigen Maßnahme bedürfen noch umfangreicher Untersuchungen.

Im Verlaufe der Recherchen und Untersuchungen zu diesem Bericht ergaben sich verschiedene offene Fragestellungen, die einer Klärung bedürfen, sollte eine derartige Maßnahme weiterhin in Betracht gezogen werden.

## **Abstract**

The objective of this report is to present a summary of basic thoughts and concepts as described in various publications on the subject of "Post-inerting of large dry containments". The report furthermore points out the obvious advantages and disadvantages of individual strategies as well as the requirements derived from the knowledge of possible accident sequences for such a concept.

Scoping calculations on the injection of inert-gas into the containment during the progress of accidents revealed additional indications as regards e.g. the required amount of inert-gas, the injection rate, and the resulting pressure behaviour in the containment. Thereby an assessment of the effectiveness as well as of the feasibility of such measures has become possible.

From the large number of different initial conclusions, two major ones are singled out and presented here:

- In principle, the technical realisation of post-inerting is possible. Thus a deflagration of hydrogen in the containment can be prevented.
- Post-inerting cannot be realised independent of the accident progress. Specific criteria for carrying out such measures will require extensive examinations.

In the course of the research and the examinations leading to this report, a number of open questions arose which need to be clarified should such a measure be further considered for implementation.

# Inhaltsverzeichnis

	Seite	
<b>1</b>	<b>Einführung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Inertisierung von Sicherheitsbehältern kerntechnischer Anlagen</b>	<b>3</b>
2.1	Grundsätzliches	3
2.2	Vorliegende Überlegungen zur Nachinertisierung von Volldruck-Sicherheitsbehältern	7
2.3	Vorinertisierung des Druckabbausystems von SWR-Reaktoren	10
<b>3</b>	<b>Technische Anwendung des Prinzips der (Nach)-Inertisierung (Erfahrungen, Grundlagen)</b>	<b>13</b>
3.1	Nutzung von Halon	13
3.2	Praxis bei SWR-Anlagen	13
3.3	Stoffdaten, Lagerung, Transport und technische Verfügbarkeit	16
3.3.1	Eigenschaften, Stoffdaten	16
3.3.2	Lagerung, Transport und technische Verfügbarkeit	17
<b>4</b>	<b>Anforderungen für eine Inertisierung aus Störfallanalysen</b>	<b>22</b>
4.1	Grundsätzliches	22
4.2	SWR-Szenarien	23
4.3	DWR-Szenarien	24
4.3.1	Einzonen CONDRU-Rechnungen zur N <sub>2</sub> - oder CO <sub>2</sub> -Nach- inertisierung	24
4.3.2	Mehrzonen RALOC-Rechnung zur N <sub>2</sub> -Nachinertisierung	28
4.3.3	DWR-Szenarien unter Umgehung des Sicherheitsbehälters	30
<b>5</b>	<b>Anforderungen an eine technische Realisierung des Inertisierungskonzepts</b>	<b>31</b>
5.1	Schalthandlungen	31
5.2	Inertgaseinspeisung	32
5.3	Vorratshaltung	33

	<b>Seite</b>	
<b>6</b>	<b>Gegenüberstellung von Vor- und Nachteilen zur Thematik der Nachinertisierung</b>	<b>35</b>
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>36</b>
<b>8</b>	<b>Literatur und Unterlagen</b>	<b>38</b>
<b>9</b>	<b>Tabellen</b>	<b>45</b>
<b>10</b>	<b>Bilder</b>	<b>61</b>

## Tabellenverzeichnis

	Seite
Tabelle 2.1: Überlegungen zur Nachinertisierung von Volldrucksicherheitsbehältern	46
Tabelle 2.2: Technische Daten zur Vorinertisierung der Siedewasser-Reaktoren (SWR)	47
Tabelle 3.1 Stoffdaten für Kohlendioxid und Stickstoff	48
Tabelle 3.2 Lagerung von Inertgasen in Druckflaschen (50 l - Standard-Flasche)	49
Tabelle 3.3 Lagerung von Inertgasen in Tanklagern	50
Tabelle 3.4 Daten für gasförmige oder flüssige Inertgaseinspeisung aus Tankanlagen (s. Tab. 3.3)	51
Tabelle 4.1 Zeitangaben zu Unfallabläufen mit Kernschmelzen	52
Tabelle 4.2 Orientierende Rechnungen mit dem Einraum-Rechencode CONDRU zu Kernschmelzunfällen mit Inertgaszufuhr	53
Tabelle 6.1 Nachinertisierung, allgemein	54
Tabelle 6.2 Auswahl CO <sub>2</sub> oder N <sub>2</sub>	55
Tabelle 6.3 Flüssige oder gasförmige Einspeisung in den SB	56
Tabelle 6.4 Inertgas-Lagerung innerhalb/außerhalb des SB	57
Tabelle 6.5 Schalthandlungen	58
Tabelle 6.6 Einspeiseort	59

## Abbildungsverzeichnis

		Seite
Bild 2.1	Langzeitige Inertgas-Einspeisung in einen 70000 cbm Sicherheitsbehälter (Zustand: kalt)	62
Bild 2.2	Langzeitige Entstehung von Gasen durch Sumpfwasser-Radiolyse nach einem Kernschmelzunfall	63
Bild 2.3	Zündbarkeitsgrenzen für ein Gasgemisch aus Wasserstoff, Luft und einem Inertgas	64
Bild 4.1	Aufsummierte Wasserstoff-Masse für verschiedene Unfallabläufe	65
Bild 4.2	Druckverläufe im Sicherheitsbehälter bei Stickstoffzufuhr	66
Bild 4.3	H <sub>2</sub> -Konzentration im Sicherheitsbehälter bei N <sub>2</sub> -Zufuhr ND*Pfad ohne Sumpfkontakt	67
Bild 4.4	Druckverläufe im Sicherheitsbehälter bei CO <sub>2</sub> -Zufuhr	68
Bild 4.5	H <sub>2</sub> -Konzentration im Sicherheitsbehälter bei CO <sub>2</sub> -Zufuhr	69
Bild 4.6	Druckverlauf im Sicherheitsbehälter bei CO <sub>2</sub> -Zufuhr	70
Bild 4.7	H <sub>2</sub> -Konzentration im Sicherheitsbehälter bei CO <sub>2</sub> -Zufuhr ND-Pfad ohne Sumpfkontakt	71
Bild 4.8	Zonendruckverlauf mit und ohne N <sub>2</sub> -Inertisierung beim ND*-Pfad	72
Bild 4.9	Temperaturverläufe in den Dampferzeuger-Räumen bei N <sub>2</sub> -Inertisierung	73
Bild 4.10	Temperaturverläufe in verschiedenen Zonen bei N <sub>2</sub> -Inertisierung	74

Bild 4.11	H <sub>2</sub> -Konzentrationsverlauf im unteren DE-Raum mit und ohne N <sub>2</sub> -Inertisierung	75
Bild 4.12	H <sub>2</sub> -Konzentrationsverlauf im mittleren DE-Raum mit und ohne N <sub>2</sub> -Inertisierung	76
Bild 4.13	H <sub>2</sub> -Konzentrationsverlauf im Treppenhaus 1 mit und ohne N <sub>2</sub> -Inertisierung	77
Bild 4.14	H <sub>2</sub> -Konzentrationsverlauf im Treppenhaus 2 mit und ohne N <sub>2</sub> -Inertisierung	78

# 1 Einführung

Im Verlauf von schweren Störfällen, d. h. wenn die Basis der Auslegung überschritten wird, können kurzfristig so große Mengen von Wasserstoff ( $H_2$ ) in den Sicherheitsbehälter freigesetzt werden, daß die für sogenannte Auslegungsstörfälle vorgesehenen Maßnahmen zur Verhinderung brennbarer Gasgemische nicht greifen bzw. unwirksam sind. Durch eine Aufkonzentration von  $H_2$ , z. B. unter zeitlich begrenzten, dampfinertisierten Zuständen, können lokal Gemischzusammensetzungen entstehen, die bei hochturbulentem oder detonationsartigem Verbrennungsablauf die Integrität des Sicherheitsbehälters, der letzten Barriere für die Rückhaltung von Spaltprodukten, gefährden können.

Verschiedene Konzepte und Methoden wurden in der Vergangenheit untersucht, um diese Gefahrensituation eines frühen Versagens des Sicherheitsbehälters zu beherrschen bzw. zu beseitigen. Nach dem Unfall im Tschernobyl-Reaktor wurde vom Hersteller kerntechnischer Anlagen in Deutschland, der Siemens AG, im Sommer 1987 mit der Entwicklung von Zündern begonnen, die, anders als in USA, unabhängig von einer externen Ansteuerung und Energieversorgung sein sollten. Das Lösungskonzept einer frühzeitigen Wasserstoff-Verbrennung sollte hiermit auf großvolumige Volldruck-Sicherheitsbehälter übertragen werden. Relativ früh ging die GRS einer alternativen Lösung nach. Bereits 1984 wurde damit begonnen, das Potential für den Einsatz katalytisch wirkender Vorrichtungen als Wasserstoff-Gegenmaßnahme auszuloten.

In verschiedenen Veröffentlichungen /1 - 18/ wurden ferner Konzepte zur Nachinertisierung der Sicherheitsbehälter-Atmosphäre diskutiert bzw. vorgeschlagen. Eine derartige Maßnahme beruht auf der Einspeisung eines Inertgases, wie z. B.  $CO_2$ ,  $N_2$ , erst **nach** dem Eintreten eines Störfalles, um eine Wasserstoff-Verbrennung zu verhindern. Während in den vergangenen 3 bis 4 Jahren verstärkt die Nutzung von Zündern, von katalytischen Rekombinatoren sowie eine Kombination von beiden, das sogenannte DUAL-Konzept, theoretisch und experimentell untersucht wurden, fand das Konzept zur Nachinertisierung nur wenige Befürworter, so daß Untersuchungen zu dessen technischer Realisierbarkeit und Effektivität unterblieben.

Um vor der Entscheidung, welches Konzept als  $H_2$ -Gegenmaßnahme zukünftig in deutschen Volldruck-Sicherheitsbehältern eingesetzt werden soll, eine verbesserte

Diskussionsgrundlage speziell für das Nachinertisierungskonzept zu schaffen, wurde diese Studie angefertigt. In ihr wird versucht, die in der Literatur beschriebenen verschiedenen Konzepte für eine Nachinertisierung zusammenfassend darzustellen, die Daten für einsetzbare Inertgase zusammenzustellen, erste Abschätzungen über benötigte Zeiten und Massen zur Inertisierung durchzuführen, aber auch in der nuklearen und konventionellen Technik mit Inertisierungsverfahren gemachte, grundsätzliche Erfahrungen zu recherchieren und zusammenzutragen.

Nachfolgend werden die Ergebnisse der verschiedenen Recherchen im Detail erläutert. Schwerpunktmäßig werden in Kapitel 2 grundsätzliche Überlegungen dargelegt, während in Kapitel 6 eine tabellarische Gegenüberstellung verschiedenartiger Vor- und Nachteile gegeben wird.

## **2 Inertisierung von Sicherheitsbehältern kerntechnischer Anlagen**

### **2.1 Grundsätzliches**

Durch eine teilweise oder vollständige Inertisierung der Atmosphäre eines Sicherheitsbehälters mit nicht kondensierbaren Gasen können während und nach einem auslegungsüberschreitenden Störfall, der zu einer teilweisen oder vollständigen Kernzerstörung (Kernschmelzen) führt, die Folgen einer unkontrollierten Wasserstoffverbrennung gemildert oder ausgeschlossen werden. Hierdurch wird eine Gefährdung der Integrität eines Sicherheitsbehälters (SB) vermieden. Für eine Inertisierung sind grundsätzlich zwei Methoden denkbar:

- a) Vollständiger Austausch des Sauerstoff-Anteils der SB-Atmosphäre durch ein Inertgas bzw. Verringerung des Sauerstoffgehaltes (Spülen).
- b) Zusätzliche Einspeisung von Inertgas zur relativen Änderung des Sauerstoffanteiles in der SB-Atmosphäre.

Methode a):

Ein teilweiser Austausch bzw. vollständiger Ersatz der Atmosphäre des Sicherheitsbehälters durch ein nicht kondensierbares Inertgas sollte nur dann durchgeführt werden, wenn keine über das normalbetriebliche Maß hinausgehenden, radioaktiven Materialien in der Atmosphäre des SB vorliegen, oder eine unmittelbare Gefahr für eine Freisetzung derartiger Stoffe besteht. Die Zielvorgabe einer derartigen Maßnahme besteht darin, den Sauerstoff in der Atmosphäre auf Werte unter 5 Vol.-% zu reduzieren, um die Bildung brennbarer Gasgemische zu verhindern. Hierdurch ergibt sich keine Druckerhöhung im Sicherheitsbehälter.

In der Regel wird eine derartige Maßnahme bei relativ kleinvolumigen Sicherheitsbehältern für den Zustand des Leistungsbetriebes durchgeführt. Diese Methode wird als Vorinertisierung bezeichnet.

Während der Störfallentwicklung ist eine Aufhebung des Isolationsabschlusses und anschließende Öffnung des Sicherheitsbehälters zum Austausch der Atmosphäre gegen ein Inertgas wegen einer möglichen Spaltprodukt-Freisetzung aus dem SB

heraus als eine sicherheitsgerichtete Maßnahme fragwürdig. Hierauf wird später noch eingegangen.

Methode b):

Wenn ein Störfall eingetreten ist, bei dem zu befürchten ist, daß er sich zu einem auslegungsüberschreitenden Störfall mit starken Kernschäden bis hin zum Kernschmelzen entwickeln kann, besteht bei nicht vorinertisierter SB-Atmosphäre die Möglichkeit einer nachträglichen Einspeisung von Inertgas (Nachinertisierung).

Durch eine derartige Zufuhr von Inertgas in einen geschlossenen SB wird der Gesamtdruck im SB erhöht. Ein hoher Volumenanteil des Inertgases im Gasgemisch führt zu einer Reduzierung der Volumenanteile der übrigen im SB vorhandenen Gase, also auch des Sauerstoffes und des Wasserstoffes. Durch eine entsprechend hohe Zufuhr von Inertgas kann so die Brennbarkeit des Gemisches verhindert werden.

Im Gegensatz zu Methode a), bei der eine Wasserstoff-Verbrennung durch die **Beseitigung** des Oxidanten Sauerstoff vermieden wird, bleiben bei der Methode b) die Massen an Wasserstoff und Kohlenmonoxyd sowie an Sauerstoff in dem Gasgemisch erhalten.

Grundsätzlich besteht die Zielvorgabe für ein Unfall-Management darin, die bei einem Störfall in den SB freigesetzten Spaltprodukte sicher einzuschließen. Diese Vorgabe sollte durch die zusätzliche Zufuhr von Inertgas in den SB zumindest nicht in der Phase, in der der Anteil an unfallbedingten Aerosolen in der SB-Atmosphäre noch hoch ist, in Frage gestellt werden, d. h. die zusätzliche Druckerhöhung durch das Inertgas sollte nicht zu einem wesentlich **früheren** Erreichen des sogenannten "Vent-Kriterium" (gezielte Druckentlastung) für den SB führen.

Diese Zielsetzung kann insbesondere dadurch realisiert werden, daß auf eine **volle** Nachinertisierung verzichtet wird. Experimente /19, 20/ belegen, daß schon bei einer **teilweisen** Inertisierung eines Wasserstoff-Luft-Gemisches mit dem Inertgasanteil von ca. 20 Vol.-% CO<sub>2</sub> die mögliche Flammenbeschleunigung stark eingeschränkt wird, so daß hochturbulente Deflagrationen und Detonationen in diesem Gasgemisch nicht zu erwarten sind. Eine teilweise Nachinertisierung führt außerdem zu einem geringeren

Druckaufbau im SB während des Unfallablaufes im Vergleich zur Vollinertisierung, verhindert jedoch nicht die Verbrennung von Wasserstoff. Auch bei einer relativ langsamen Verbrennung großer Mengen an Wasserstoff kann durch den entsprechenden Energieeintrag die Integrität des SB gefährdet sein. Somit ist eine teilweise Inertisierung nur in Verbindung mit einer Maßnahme zur Begrenzung und zum Abbau der Wasserstoffkonzentration in der Atmosphäre des SB sinnvoll, z. B. unter Nutzung katalytisch wirkender Rekombinatoren.

Es zeigt sich grundsätzlich, daß Methode b) nicht, wie Methode a), störfallunabhängig betrachtet werden kann. Für verschiedene Störfallabläufe sind unter Umständen unterschiedliche Einspeisezeitpunkte (Beginn der Nachinertisierung), unterschiedliche Einspeiseraten und unterschiedliche Einspeisemengen unter Beachtung der Druckentwicklung aus dem Störfall sinnvoll (Beispiele hierzu siehe Kapitel 4.3).

Für eine Inertisierung sind grundsätzlich die Gase Wasserdampf ( $H_2O$ ), Stickstoff ( $N_2$ ), Kohlendioxyd ( $CO_2$ ) und Halon 1301 denkbar. Letzteres Gas scheidet aber aus, da aus Umweltschutzgründen ab 1992 kein Halon mehr zur Verfügung steht, siehe auch Kapitel 3.1. Wasserdampf, der durch den Störfall wesentlich zum Druckaufbau im SB beiträgt und bereits einen Inertisierungseffekt bewirkt, ist aufgrund seiner Fähigkeit zur Kondensation nicht sinnvoll für eine langfristig wirksame Inertisierungs-Maßnahme. Es verbleiben unter diesen Randbedingungen die nicht kondensierbaren Gase  $CO_2$  und  $N_2$  für die weiteren Betrachtungen übrig.

Beide Gase haben, im Vergleich gesehen, verschiedene Vor- und Nachteile. Hierzu sei z. B. auf Bild 2.1 verwiesen, welches die vorgenannten Gase  $H_2O$ ,  $CO_2$ ,  $N_2$  und Halon im Vergleich zeigt. Wird vom Normalzustand im Sicherheitsbehälter ausgegangen (ca. 20 °C, 1 bar), so zeigt die Ordinate (Abszissenwert 0.0) des Diagrammes, daß eine Inertgaseinspeisung von ca. 191 t  $CO_2$  in einen SB von 70.000 m<sup>3</sup> genügt, um eine Zündfähigkeit von Wasserstoff zu vermeiden (> 56 Vol.-%, siehe Bild 2.3). Die Zuführung dieser  $CO_2$ -Menge in den geschlossenen SB führt zu einem Druckaufbau bis zu ca. 2,9 bar.

Bei einer Inertisierung mit  $N_2$  liegt die vergleichbare Menge bei ca. 230 t (> 70 Vol.-%, siehe Bild 2.3), der Druck steigt bei kalten Bedingungen im SB durch den zugeführten Stickstoff auf 4,2 bar.

Der Vergleich im Bild 2.3 mit Wasserdampf zeigt, daß eine  $\text{CO}_2$ -Inertgas-Zufuhr den Brennbarkeitsbereich nur gering verändert, während die Zufuhr von  $\text{N}_2$  den Brennbarkeitsbereich beträchtlich erweitert. Dies bedingt weiter eine größere Stickstoffmenge - und damit einen höheren SB-Druck -, um eine Verbrennung von  $\text{H}_2$  zu verhindern. Somit ergeben sich einige Vorteile für eine  $\text{CO}_2$ -Inertisierung gegenüber der Verwendung von  $\text{N}_2$  als Inertgas-Einspeisung.

Eine Nachinertisierung wird vorrangig diskutiert, um kritische Situationen während der ersten Stunden und der ersten Tage nach Unfalleintritt zu beherrschen, d. h., ein frühes Versagen des Sicherheitsbehälters durch eine Wasserstoff-Detonation zu verhindern.

In der Langzeitphase nach einem Unfall, nach Wochen, Monaten und u. U. auch Jahren können durch eine Sumpfradiolyse beträchtliche Massen an Wasserstoff, aber auch Sauerstoff gebildet und in den SB freigesetzt werden. Wesentlich ist hierbei der Sauerstoff, welcher langfristig zu einer Deinertisierung führt. Aus Bild 2.2 ist z. B. ersichtlich, daß nach 3 Wochen 2 bis 3 t Sauerstoff entstanden sein können. Höhere als hier betrachtete Entstehungsraten sind möglich, wenn z. B. eine Wasserüberdeckung von Schmelze vorliegt oder das Sumpfwasser besonders verschmutzt ist. In Bild 2.1 sind die zur Aufrechterhaltung der Inertisierung erforderlichen, zusätzlichen Inertgas-mengen und der entstehende Gesamtdruck in Abhängigkeit des durch Radiolyse gebildeten Sauerstoffes dargestellt (ohne Druckanteil des Wasserdampfs aus einem Störfall).

Bei einer aus den obengenannten Gründen erforderlichen mehrfachen Nachinertisierung mit Inertgas kann bereits nach mehreren Monaten das Druckniveau der SB-Auslegung, sogar im kalten Zustand, erreicht werden. Der SB steht hierdurch dauerhaft unter hohem Druck, was zu einer erhöhten Leckage aus dem SB führen kann.

Zur Frage der Einspeisung von Inertgasen in den Sicherheitsbehälter in flüssiger oder gasförmiger Form ist zu vermerken, daß zwar in der Regel die Lagerung, z. B. von  $\text{N}_2$  in tiefkaltem, flüssigen Zustand stattfindet, eine Einspeisung des Stickstoffs jedoch bei den meisten technischen Anwendungen zur Brandbekämpfung wie auch z. B. bei der Vorinertisierung von SWR-Sicherheitsbehältern immer in gasförmigem Zustand (aufgewärmt auf 15 - 20 °C) durchgeführt wird. Dies trifft auch für den großtechnischen Transport von  $\text{N}_2$  in sogenannten Pipelines zu (siehe hierzu auch Kapitel 3).

Zu beachten ist, daß eine Flüssiggas-Einspeisung, insbesondere bei  $N_2$ , lokal zu erheblichen Problemen durch die Kaltgasbeaufschlagung (Kälteschock) von Komponenten führen kann, die zur Störfallbeherrschung erforderlich sind.

Die Vorratshaltung von Inertgasen **außerhalb** des Sicherheitsbehälters stellt kein technisches Problem dar. Lagermengen bis zu 50 t sind Standard. Größere Mengen (in diesem Fall ~200 t) können entweder in mehreren Standard-Behältern gelagert oder in gesondert gefertigten Großbehältern aufbewahrt werden. Hierin wird kein größeres technisches Problem gesehen, wenn auch derartige Großbehälter zur Zeit noch nicht verfügbar sind. Die Lagerung in Großbehältern ist jedoch wegen des zusätzlich erforderlichen Lagergebäudes (Bunker), das die Kernkraftwerksanlage u. a. gegen einen evtl. Zerkrall des Inertgasbehälters schützt (siehe auch Kap. 3.2, 3.3), aufwendig.

Die Lagerung der für eine Nachinertisierung des SB erforderlichen Mengen in flüssiger Form (siehe Kap. 3.3) **innerhalb** des Sicherheitsbehälters ist wegen der Größe des Lagerbehälters, deren Schutzmaßnahmen (Verbunkerung), der notwendigen Instrumentierung (Zugänglichkeit) technisch sehr aufwendig und bedarf einer besonderen Prüfung der Verträglichkeit mit dem bestehenden

Sicherheitskonzept. Eine Lagerung von Inertgas in Flaschen innerhalb des SB ist wegen der hohen Anzahl der erforderlichen Standardflaschen (siehe Tabelle 3.2) und des technischen Aufwands für die Verbindungsleitungen fragwürdig.

Auf die hier kurz aufgezeigten Problempunkte wird in den nachfolgenden Kapiteln näher eingegangen.

## **2.2 Vorliegende Überlegungen zur Nachinertisierung von Volldruck-Sicherheitsbehältern**

Untersuchungen zur Nachinertisierung der Atmosphäre eines Sicherheitsbehälters im Verlauf schwerer Störfälle wurden seit Anfang der 80iger Jahre mit unterschiedlicher Zielsetzung durchgeführt. Dabei standen grundsätzliche Fragen zur Auswahl geeigneter Inertgase, erforderlicher Einspeisemengen und -zeiten, Auswirkungen auf den Störfallablauf und mögliche Fehlanregungen im Vordergrund des Interesses. Erste Arbeiten /1, 4, 5, 6, 8/ begannen bereits 1979 und untersuchten systematisch das Potential verschiedenartiger Maßnahmen zur Beseitigung von  $H_2$  bzw. Verhinderung von

H<sub>2</sub>-Verbrennungen. Dabei wurde auch auf Erfahrungen der Industrie, der NASA u. ä. bei Störfällen mit H<sub>2</sub> eingegangen. Ohne auf einzelne technische Lösungen zur Nachinertisierung im Detail einzugehen, werden in /1, 4, 5, 6, 8/ die Grundprinzipien dargelegt und eine Eignung für DWR-1300 Anlagen mit einem Volldrucksicherheitsbehälter diskutiert. Als geeignete Gase wurden N<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> und Halone genannt. Als Verfahren wurde der Austausch der SB-Atmosphäre gegen Inertgas oder die Zugabe von Inertgas untersucht. Die wesentlichen Ergebnisse zu Einspeisezeiten und Gasmengen sowie zur Eignung verschiedener Gase für eine Nachinertisierung sind Tabelle 2.1 zu entnehmen.

Nahezu zeitgleich erschien eine Arbeit in USA /3/, in der ähnliche Überlegungen zur Nachinertisierung eines Niederdruck-Sicherheitsbehälters (Mark III) angestellt und diese Maßnahmen mit einem Zündkerzenkonzept verglichen wurden. Diese Untersuchung geht von einer CO<sub>2</sub>-Kaltgas-Einspeisung aus und weist auf eine Vielzahl von Problemen hin, die grundsätzlich im Zusammenhang mit einer Nachinertisierung auftreten (Störfallerkennung, rechtzeitiges Einspeisen, irreversible Entscheidung zur Einspeisung, zusätzliche Aktionen des Anlagenpersonals in streßerfüllter Unfallphase, Direkteinspeisung in die Wasservorlage des Druckabbausystems, langzeitige Druckerhöhung, Fehleinspeisung, insbesondere auch bei Prüfung und Wartung, mit der möglichen Folge erschwerter Störfallbedingungen). Diese Arbeit gibt Hinweise zu notwendigen Aktionen für das Einspeisen, zu Zuverlässigkeiten und Redundanzen der erforderlichen Ventile, zum Energiebedarf sowie zu Prüfmöglichkeiten. Rechnungen zum Druck- und Temperaturverlauf für verschiedene Einspeiseraten werden gezeigt. Insbesondere wegen der Unsicherheiten über den zu erwartenden Störfallablauf zum Zeitpunkt der Einspeisung und wegen der möglichen Folgen bei einer Fehleinspeisung von Kaltgas wurde ein Konzept zur Nachinertisierung verworfen.

Eine spätere Arbeit /7/ untersuchte die Eignung von Halon für die Nachinertisierung eines Volldruck-Sicherheitsbehälters. Die damalige, positive Bewertung wurde inzwischen durch das Produktionsverbot von Halon überholt.

In /9/ wird ein Versuchsprogramm für den HDR zur Problematik der Verteilung von Inertgasen bei Einspeisung in die Anlagenräume oder in den Kuppelbereich unter Störfallbedingungen vorgeschlagen, dem Vorstellungen zu einem Inertisierungssystem für eine DWR-Anlage zugrunde liegen. Spezifische Angaben dazu sind in Tabelle 2.1 aufgeführt. Die Einspeisung von Flüssiggas könnte im Zeitbereich

> 15-20 min nach Störfallbeginn erfolgen. Im weiteren Verlauf von Störfällen soll der SB über die Ventleitung und Filter gesteuert vom Druck entlastet werden.

Eine weitere Arbeit /17/ befaßt sich mit den Risiken einer Zündeinrichtung in deutschen Stahl-Sicherheitsbehältern und empfiehlt das Spülen des SB zum Zeitpunkt, wenn eindeutige Kriterien für ein zu erwartendes Kernschmelzen vorliegen und erst geringe Mengen an Spaltprodukten im SB vorhanden sind. Die angegebenen Zeiten und Mengen sind ebenfalls in Tabelle 2.1 enthalten. Die anschließende Arbeit /18/ setzt die Argumentation aus /17/ fort und zeigt erste Rechnungen zur Gasverteilung und Temperaturschichtung bei einer Flüssiggaseinspeisung mit gleichzeitiger Entlüftung und ergänzendem Außensprühen. Die Ergebnisse zeigen eine vollständige Inertisierung aller Raumbereiche.

Die in /19/ dargestellten Ergebnisse eines Forschungsprogramms zeigen die Einflüsse von Stickstoff- und Kohlendioxyd-Anteilen in einem Wasserstoff-Luft-Gemisch auf den Verbrennungsablauf auf. Bereits ein Anteil von 20 Vol.-% CO<sub>2</sub> im Gasgemisch reicht demnach aus, um die Flammenpropagation so stark zu begrenzen, daß hochturbulente Deflagrationen und Detonationen nicht auftreten. Die umfangreichen Grundlagenversuche wurden im Labormaßstab durchgeführt. Nach /19/ sind weitere Untersuchungen, speziell zur Übertragbarkeit der Ergebnisse auf reale Verhältnisse in DWR-Anlagen notwendig. Diese Ergebnisse bilden die Basis für Überlegungen zu einer teilweisen Nachinertisierung einer Unfall-Atmosphäre.

In /32, 33/ werden mögliche Vor- und Nachteile von Vor- und Nachinertisierungsmaßnahmen für DWR-Anlagen aufgezeigt und diskutiert. Die technischen Daten, welche diesen Recherchen zugrunde gelegt wurden, sind in Tabelle 2.1 aufgeführt. Eine Nachinertisierung bei Bedarf wird nach /33/ nicht empfohlen, da z. B. die Entscheidung hierzu in einigen Fällen bereits innerhalb von 0,5 h zu treffen ist, obwohl komplexe Entscheidungskriterien zu beachten und u. U. unzureichend sind. Ferner wird angeführt, daß gasförmige Einspeisungen vielfältige Schaltheandlungen erfordern und eine flüssige Einspeisung sich sicherheitstechnisch ungünstig auf Komponenten, Meßtechnik usw. auswirken kann. Der zusätzliche Druckanstieg ist bei einer teilweisen Nachinertisierung, insbesondere bei CO<sub>2</sub>, nicht wesentlich im Gegensatz zu einer Vollinertisierung; Deflagrationen sind bei einer Teilinertisierung jedoch weiterhin möglich.

Die Ergebnisse dieser Arbeiten können folgendermaßen zusammengefaßt werden:

Technisch ist eine wirksame Nachinertisierung eines Volldrucksicherheitsbehälters mit konventionell bekannten Verfahren durchaus möglich. Da eine Nachinertisierung jedoch auch sicherheitstechnische Nachteile bedingt, ist die Mehrheit der Autoren (deren Arbeit hier ausgewertet wurde) der Meinung, daß störfallabhängige, eindeutige Einspeisekriterien vor einer Nachinertisierung verfügbar sein müssen. Klare Vorstellungen für den praktischen Zeitbedarf von "Einspeisekriterien erfüllt" über "Einspeisung vorbereiten" bis "Einspeisebeginn" bestehen nicht, auch wenn Anforderungen an Einspeisebeginn und -ende angeführt werden. Die Problematik einer "richtigen" Einspeiseentscheidung zu einem frühen Zeitpunkt auf der Basis möglicherweise unzureichender Entscheidungskriterien ist offensichtlich. Weitere Details zu den verschiedenen Untersuchungen sind Tabelle 2.1 zu entnehmen (siehe hierzu auch Kapitel 3 und 4).

### **2.3 Vorinertisierung des Druckabbausystems von SWR-Reaktoren**

Wie sich aus Untersuchungen zu auslegungsüberschreitenden Ereignisabläufen mit Kernschmelzen für SWR-Anlagen ergab, entstehen hierbei größere Mengen an Wasserstoff (2 bis 3fache Zirkonmasse im Kernaufbau gegenüber DWR), die in den Sicherheitsbehälter freigesetzt werden. Um eine Wasserstoffverbrennung bei hohen Konzentrationen in den relativ kleinvolumigen Sicherheitsbehältern mit Druckabbausystemen zu vermeiden, empfahl die Reaktorsicherheitskommission im Dezember 1986 die Vorinertisierung für SWR-Anlagen /21/. Die Inertisierung erfolgt mit dem Gas Stickstoff.

Das Inertisierungssystem hat folgende Aufgaben:

- nach dem Anfahren der Reaktoranlage die im SB befindliche Luft bis auf eine bestimmte Rest-O<sub>2</sub>-Konzentration (im allgemeinen < 5 Vol.-%) gegen Stickstoff auszutauschen.
- Aufrechterhaltung des Inertzustandes nach erfolgter Inertisierung während des Leistungsbetriebes (hier *auch* als "Nachinertisierung" bezeichnet, siehe Tab. 2.2).

Weiterhin sind folgende Aufgabenstellungen zu beachten:

- Überwachung des O<sub>2</sub>-Gehaltes im SB.
- Deinertisierung (Spülen) zur Wiederherstellung der Begehbarkeit des SB's.

Für die meisten SWR-Anlagen der Baulinie 69 ist eine getrennte Inertisierung/Deinertisierung des Steuerstabantriebsraumes (SAR) vorgesehen. Im Kernkraftwerk Wür-gassen ist der Steuerstabantriebsraum dagegen lüftungstechnisch von der Druckkam-mer (DK) nicht zu trennen und wird gemeinsam mit dieser inertisiert bzw. gespült.

Die Inertisierung der DK und der Kondensationskammer (KK) kann unabhängig von-einander erfolgen. Zweckmäßigerweise wird zuerst die KK inertisiert, danach die DK. Mit der Inertisierung der DK wird erst begonnen, wenn alle Wiederholungsprüfungen und Kontrollbegehungen beim Anfahren der Anlage abgeschlossen sind, und die An-lage in den vorgesehenen Dauerbetriebszustand übergeht.

Die Inertisierung erfolgt nach dem Mischungsprinzip, d.h. in die vorhandene Luft im SB wird auf 15-20°C vorgewärmter, gasförmiger Stickstoff eingeleitet. Dieser ver-mischt sich über die laufende Umluftanlage mit der Luft im SB; eine dem N<sub>2</sub>-Einspeisestrom entsprechende Gemischmenge wird dabei gleichzeitig abgesaugt.

Die Deinertisierung erfolgt mit Hilfe der Umluft- und der Spülluftanlage. Mit der Deinertisierung des SB wird nicht früher als 24 h vor dem geplanten Abfahrvorgang begon-nen. Muß hierbei nur die DK begangen werden, wird nur diese gespült; die KK bleibt dabei in inertisiertem Zustand.

Die wesentlichen Bestandteile des Inertisierungssystems sind:

- N<sub>2</sub>-Versorgungsstation mit N<sub>2</sub>-Verdampferanlage und Vorwärmanlage.
- N<sub>2</sub>-Einspeiseleitung in SAR, KK, DK + SAR mit Steuer- und Absperrorganen so-wie der entsprechenden Mengen-, Druck- und Temperaturmeßstellen.

Das N<sub>2</sub>-Inertisierungssystem wirkt zusammen mit:

- der Umluftanlage innerhalb des Druckabbausystems (DAS)
- der Spülluft/Abluftanlage,
- dem H<sub>2</sub>-Abbausystem,

- dem H<sub>2</sub>-Probenahmesystem,
- der Instrumentierung des SB.

Die Einbindung der N<sub>2</sub>-Einspeisung erfolgt vor den Doppelabsperungen der SB-Abschlußarmaturen in bestehende Systeme. Für die Spülgasabfuhr werden ebenfalls bestehende Systeme benutzt.

Die beim Inertisieren und Deinertisieren (Spülen) auszutauschenden bzw. abzugebenden Gasmisch- /Luftmengen werden über die Filterstrecke der Spülanlage, bestehend aus Schwebstoff- und Aktivkohlefilter, und den Kamin ins Freie geleitet. Zusätzliche radioaktive Emissionen sind damit nicht verbunden.

Eine Inertisierung dauert in der Regel zwischen 3 und 20 h (siehe Tabelle 2.2), wogegen die Deinertisierung schneller erfolgen kann.

Für die O<sub>2</sub>-Überwachung werden aus der Druckkammer, Kondensationskammer und dem Steuerstabantriebsraum Gasproben über die vorhandenen Leitungen des H<sub>2</sub>-Probenahmesystems bezogen.

Zur Bestimmung der O<sub>2</sub>-Konzentration wird das H<sub>2</sub>-Probenahmesystem auf zwei O<sub>2</sub>-Analysatoren umgeschaltet. Während des Inertisierungsvorganges werden alle Meßstellen des Probenahmesystems der Reihe nach abgefragt bis die gewünschte O<sub>2</sub>-Endkonzentration im Sicherheitsbehälter erreicht ist.

Nach einer Deinertisierung ist eine Begehung des Sicherheitsbehälters grundsätzlich erst zulässig, wenn sichergestellt ist, daß ein bestimmter O<sub>2</sub>-Gehalt (im allgemeinen > 17-19 Vol.-% O<sub>2</sub>) erreicht ist.

Die O<sub>2</sub>-Konzentration im Sicherheitsbehälter wird auf der Warte angezeigt und registriert. Ergibt die betriebliche O<sub>2</sub>-Überwachung der inertisierten Anlage einen Anstieg  $\geq 5\%$  O<sub>2</sub>, so muß nachinertisiert werden.

Die technischen Daten zur Vorinertisierung von SWR-Reaktoren sind in Tabelle 2.2 zu finden.

### **3 Technische Anwendung des Prinzips der (Nach)-Inertisierung (Erfahrungen, Grundlagen)**

#### **3.1 Nutzung von Halon**

In /6/ wird die Inertisierung mit Halon 1301 vorgeschlagen. Halon 1301 ist eine durch Fluor und Brom halogenisierte Kohlenwasserstoffverbindung mit der chemischen Bezeichnung Monobromtrifluormethan ( $\text{Br C F}_3$ ). Die ausgezeichnete Feuerlöschwirkung dieses Gases beruht auf einer Zersetzung des Halons 1301 unter Temperatureinwirkung über  $510\text{ }^\circ\text{C}$ . Bei der Zersetzung entstehen: Brom ( $\text{Br}_2$ ), Bromwasserstoff ( $\text{H Br}$ ), Fluorwasserstoff ( $\text{HF}$ ) und Carbonylhalogenide ( $\text{COF}_2$ ,  $\text{CO Br}_2$ ). Die Zersetzungsprodukte des Halons 1301 verhindern die Aktivierung des Luftsauerstoffs durch Einfangen von freien Elektronen in der Reaktionsfront der Flamme. Da die freigesetzten Halogen-Verbindungen jedoch neuerdings im Verdacht stehen, die schützende Ozon-Schicht der Erdatmosphäre zu schädigen, können die an sich technisch guten Eigenschaften dieses Gases, insbesondere der sehr begrenzte Zündbereich des Wasserstoffs im Dreistoffdiagramm nicht weiter genutzt werden: Ab 1992 wird in Deutschland aus Umweltschutzgründen kein Halon mehr ausgeliefert.

#### **3.2 Praxis bei SWR-Anlagen**

Anhand des Beispiels der Siedewasser-Reaktoranlage Philippsburg (KKP-1) soll die Praxis der Vorinertisierung bei SWR-Kernkraftanlagen erläutert werden /22/.

Die gesamte Stickstoff ( $\text{N}_2$ )-Inertisierung für KKP-1 gliedert sich im wesentlichen in fünf Bereiche:

1.  $\text{N}_2$ -Bereitstellung
2.  $\text{N}_2$ -Verdampfung (kalt)
3. Druckeinstellung für  $\text{N}_2$ -System
4. Aufwärmung des  $\text{N}_2$  auf Raumtemperatur
5. Regel- und Einspeisebereich in den Sicherheitsbehälter

## **Zu 1: N<sub>2</sub>-Bereltstellung**

Die N<sub>2</sub>-Lagerung erfolgt in einem doppelwandigen, zylindrischen, liegenden Behälter von ca. 10 m Länge und einem Durchmesser von 2,6 m (Außenbehälter). Der innenliegende Behälter von ca. 31,5 m<sup>3</sup> Inhalt enthält flüssigen Stickstoff und ist gegen den umliegenden äußeren Behälter durch eine Vakuum- und Perlit-Isolierung geschützt. Das Vakuum wird 1/4 jährlich von der Lieferfirma Messer-Griesheim überprüft. Eine gezielte Vakuumüberwachung seitens KKP-1 ist nicht vorgesehen. Die N<sub>2</sub>-Anlage ist von Messer-Griesheim gemietet (siehe auch Kap. 3.3). Der N<sub>2</sub>-Tank wird von einem N<sub>2</sub>-Schutzgebäude (Berstschutz-Bunker), das auf der dem Fortluftkamin abgewandten Längsseite offen ist, umgeben. Die errechnete Druckbelastung auf die Frontwand des Bunkers beträgt bei einem evtl. Bersten des N<sub>2</sub>-Behälters ca. 4,8 bar! Der N<sub>2</sub>-Behälter ist für eine maximale Füllmenge von ca. 21270 m<sup>3</sup> N<sub>2</sub> (bei 1 bar, 15°C, 95 % Füllungsgrad) ausgelegt. Da bei dieser Füllmenge der Mengenverlust an N<sub>2</sub> relativ hoch ist, wird betrieblich mit einer Füllmenge von ca. 15500 m<sup>3</sup> N<sub>2</sub> gefahren. Die Zustände des flüssigen N<sub>2</sub> liegen zwischen - 169 °C und 8 bar (kurz nach Befüllung) und - 150 °C und 15 bar (Abblasedruck). Die angegebene Menge reicht für eine Vollinertisierung des Sicherheitsbehälters und 4 Teil-Inertisierungen (Steuer- stabantriebsraum) aus. Über die N<sub>2</sub>-Verluste wurde bei KKP-1 eine Statistik geführt. Hiernach betragen die Verdunstungs-Verluste (Januar-April 1989) ca. 86 m<sup>3</sup> pro Tag. Bezogen auf den Füllinhalt von 15500 m<sup>3</sup> ist dies 0,55 %/d. Diese Verluste (~31400 m<sup>3</sup>/a) werden durch die liegende Anordnung des N<sub>2</sub>-Behälters begünstigt (bei voller Füllung ungünstiges Oberflächen/Volumen-Verhältnis). Die N<sub>2</sub>-Nachlieferung kann innerhalb eines Tages mit einem 15000 m<sup>3</sup>-Tankwagen (mit Anhänger) erfolgen.

## **Zu 2: N<sub>2</sub>-Verdampfung**

Auf dem Dach des N<sub>2</sub>-Schutzgebäudes befinden sich 3 parallel geschaltete Luftverdampfer (siehe auch Kap. 3.3), die ihre Energie zur Verdampfung des flüssigen N<sub>2</sub> der Umgebungsluft entziehen. Das jetzt noch relativ kalte (10 °C unter Umgebungstemperatur) und unter zu hohem Druck stehende N<sub>2</sub>-Gas wird der im folgenden kurz beschriebenen Druckreduzierstation zugeführt.

### **Zu 3: Druckreduzierstation**

Nach der Verdampfung wird der gasförmige Stickstoff über eine festeingestellte (5 bar) Druckminderung über den Hauptweg zur SB-Inertisierung (Leitung DN 80) mit einem Volumenstrom von ca. 1500 m<sup>3</sup>/h weitergeleitet. Für Teil- und Nachinertisierungen steht eine parallele Strecke (Druckminderung auf 1,5 bar) mit einem Volumenstrom von 150 m<sup>3</sup>/h (Leitung DN 40) zur Verfügung. Die Leitung DN 40 mündet in die Hauptleitung DN 80.

### **Zu 4: Nachwärmung auf Raumtemperatur (RT)**

Da der Stickstoff aus der Druckreduzierstation relativ kalt abströmt, ist eine elektrische Aufwärmung des N<sub>2</sub> auf Raumtemperatur (ca. 20 °C) notwendig. Der 1500 m<sup>3</sup>/h-Volumenstrom wird dabei im Temperaturregelbereich von 10 - 55 °C auf Raumtemperatur (max. 45 °C) erwärmt. Die Anlage hat eine Kapazität von ca. 30 KW. Für die Nachinertisierung (150 m<sup>3</sup>/h) reicht meist die Wärmeaufnahme aus den langen Rohrleitungen aus, so daß in diesem Fall keine elektrische Nachwärmung des N<sub>2</sub> erforderlich ist.

### **Zu 5: Regel- und Einspeisebereich**

Das auf RT aufgewärmte N<sub>2</sub> wird in die Druckkammer (DK 3700 m<sup>3</sup>) und den Steuerstabantriebsraum (SAR 600 m<sup>3</sup>) sowie getrennt in die Kondensationskammer (KK 2172 m<sup>3</sup>) eingespeist. In der DK wird der N<sub>2</sub> auf verschiedenen Höhencoten eingeleitet, wobei die Inertisierung im Spülverfahren erfolgt, d. h. ein dem zugeführten N<sub>2</sub>-Volumenstrom äquivalenter Gemischvolumenstrom wird über die Abluftleitung abgeführt. Zur Verbesserung der N<sub>2</sub>-Verteilung wird die Umluftanlage mitbetrieben (75000 m<sup>3</sup>/h, Luftwechsel: 10/h). Die Inertisierungszeiten betragen für die DK + SAR ca. 4,1 h, die KK ca. 2,4 h, (siehe auch Tabelle 2.2); die Deinertisierungszeit für DK + SAR ist in ca. 3 h abgeschlossen und für die KK in ca. 1,5 h. Der SAR ist auch getrennt spülbar. Die Kontrolle des Restgehaltes an O<sub>2</sub> (< 4-5 %) wird über das installierte H<sub>2</sub>-Überwachungssystem durchgeführt, wobei in diesem Fall auf eine O<sub>2</sub>-Meßzelle umgeschaltet wird.

### 3.3 Stoffdaten, Lagerung, Transport und technische Verfügbarkeit

#### 3.3.1 Eigenschaften, Stoffdaten

Die für eine Inertisierung interessierenden Gase Stickstoff und Kohlendioxid sind in molekularer Form in der Natur als Bestandteile der Luft vorhanden. Die Menge des Stickstoffs in der Luft beträgt ungefähr 78 Vol.-%, die des Kohlendioxids rund 0,03 Vol.-%. Bezüglich der Eignung als Inertgas verhalten sich beide Gase sehr ähnlich. Bei Langzeit-Inertisierungen (z. B. Vorinertisierung von SWR-Anlagen) wird Stickstoff bevorzugt, weil Kohlendioxid im Langzeitbereich Korrosionsprobleme mit sich bringen kann. Letzteres spielt sicher eine untergeordnete Rolle bei Nachinertisierungen im Verlaufe von Störfall-Szenarien.

Werden bei einer Teilinertisierung Wasserstoffbrände im SB möglich, ist die Frage der Temperatur-Beständigkeit der eingesetzten Inertgase, insbesondere von  $\text{CO}_2$ , von Wichtigkeit. Eine Dissoziation von  $\text{CO}_2$  tritt jedoch erst ab ca. 1900 K ( $\sim 1600\text{ °C}$ ) auf. Das Gas spaltet sich in CO und  $\text{O}_2$ . Bei höheren Temperaturen ( $> 2100\text{ K}$ ) entsteht auch atomarer Sauerstoff. Die Dissoziationsraten von  $\text{CO}_2$  sind in dem genannten Temperaturbereich relativ klein, es bleiben  $\text{CO}_2$ -Anteile von  $> 95\%$  (1-6 bar) erhalten. Mit zunehmendem Druck nimmt die Dissoziationsrate wieder ab. Wesentlich höhere Temperaturen als oben angeführt, sind durch Wasserstoff-Verbrennungen im SB nicht zu erwarten.

Die wichtigsten Stoffdaten für die Inertgase  $\text{CO}_2$  und  $\text{N}_2$  sind in Tabelle 3.1 zusammengefaßt.

Bezogen auf die schon in Kap. 2.1 aufgeführten Mindestmengen an Inertgas für eine volle Nachinertisierung (keine Brennbarkeit der Gase) sind in Tabelle 3.2 spezifische Daten für eine Flaschenlagerung von  $\text{CO}_2$  und  $\text{N}_2$  aufgeführt. Zum Vergleich enthält Tabelle 3.3 entsprechende Daten für eine Tanklagerung der Inertgase  $\text{CO}_2$  und  $\text{N}_2$ . Die Tabelle 3.4 verzeichnet spezifische Daten für die gasförmige oder flüssige  $\text{CO}_2$ - oder  $\text{N}_2$ -Einspeisung in den Sicherheitsbehälter.

Bei einer Flüssiggaseinspeisung von Inertgasen wäre eine Zuführung des tiefkalten flüssigen Inertgases über eine Strahlpumpe denkbar, bei der die flüssigen Gase mit der Atmosphäre des SB in der Strahlpumpe vermischt werden. Voraussetzung für

einen derartigen Einsatz sind größere Raumbereiche (Energieinhalt), in denen ferner keine sicherheitstechnisch notwendigen Systeme angestrahlt werden können. Die Austrittstemperatur des Gemisches könnte dabei z. B. auf über 0 °C gehalten werden. So wären z. B. bei einem Mischungsverhältnis von 5 (Atmosphäre im SB zu Inertgas) eine Atmosphären-Temperatur von ca. 69 °C für flüssiges N<sub>2</sub> erforderlich. Bei CO<sub>2</sub> liegt die Temperatur ähnlich. Bei höheren Mischungsverhältnissen sind auch niedrigere Atmosphärentemperaturen brauchbar. Wie aus den Tabellen 3.2 bis 3.4 ersichtlich, sind für die Leitungen, Ventile u. a. beim Inertgas N<sub>2</sub> bei flüssiger Zuführung in den SB Sonderwerkstoffe (- 162 °C) erforderlich.

Bei Tanklagerung der Inertgase läßt sich auch eine Einführung von Wärme in den Tank (Verdampfer), z. B.: bei CO<sub>2</sub>, denken. Bei Stickstoff ist nur eine elektrische Tankheizung möglich, da Kältemittel wegen der niedrigen Temperaturen nicht eingesetzt werden können.

### **3.3.2 Lagerung, Transport und technische Verfügbarkeit**

#### **Stickstoff-N<sub>2</sub>**

Für Speicherung und Transport von Stickstoff-flüssig sind hochwertig vakuumisolierte Behälter gebräuchlich /23, 24/. Die Anforderungen an die Qualität der Isolation steigen mit abnehmender Behältergröße, da das Verhältnis Oberfläche zu Inhalt dabei immer ungünstiger wird.

Der flüssige, tiefkalte Stickstoff wird in Tankwagen transportiert. Je nach Erfordernissen werden nach /24/ kleine Verteilerfahrzeuge (Fassungsvermögen 6000 bis 15000 l) oder große Überland-Satteltankwagen (bis zu 30000 l) eingesetzt.

Die Speicherbehälter für tiefkalte flüssige Gase sind auf die Anforderungen für jeweiligen Einsatzfälle zugeschnitten /24/.

Entsprechend der Aufgabenstellung werden die Speicherbehälter unterschieden in:

- Kaltvergaser (Flüssiggas-Speicherbehälter)
- Kältetank

### **Kaltvergaser**

Das verflüssigte Gas wird mit dem erforderlichen Druck, der durch tiefkalte Verdampfung aufrecht erhalten wird, in benötigter Menge dem Kaltvergaser entnommen, in einem nachgeschalteten Verdampfer in Gas umgewandelt und in das Verbrauchsnetz eingespeist.

### **Kältetank**

Zur direkten Verwendung als Kälte­träger wird tiefkalter flüssiger Stickstoff gespeichert und in flüssiger Form entnommen. Die Speicherbehälter (Standardgrößen 2230 bis 238000 l geom. Inhalt) sind serienmäßig nach der Druckbehälterverordnung hergestellt und durch den TÜV geprüft. Kaltvergaser und Kältetanks sind doppelwandige Behälter vorwiegend in stehender Bauweise. Der innere zylindrische Druckbehälter besteht aus kaltzähem Stahl, der Außenbehälter aus Kohlenstoff-Stahl, der durch einen hochwertigen Zwei-Komponenten-Anstrich dauerhaft gegen Korrosion geschützt wird.

Die Isolierung wird meist in Pulver-Vakuum-Technik ausgeführt. Für besondere Anforderungen sind auch Super-Vakuum Isolierungen lieferbar. Der Innenbehälter ist durch zwei Sicherheitsventile abgesichert. Jedes einzelne Sicherheitsventil gewährleistet die Absicherung des Behälters. Der Ansprechdruck kann ohne Druckveränderung im Behälter und ohne Demontage der Sicherheitsventile überprüft werden. Eine Überdrucksicherung am Außenbehälter verhindert einen Überdruck im Isolierraum. Die bei den Kaltvergasern erforderlichen Luftverdampfer arbeiten meist energieunabhängig und umweltfreundlich. Die aus dem Kaltvergaser (Speicherbehälter) entnommene kryogene Flüssigkeit wird im nachgeschalteten Luftverdampfer in den gasförmigen Aggregatzustand umgewandelt und durch eine Rohrleitung zum Verbrauchsort geführt. Die z. B. von der Firma Messer-Griesheim /24/ vertriebenen Luftverdampfer bieten durch ihre Aluminium-Rippen-rohr-Konstruktion eine große Wärmeaustauschfläche, die selbst bei Verbrauchsspitzen eine zuverlässige Versorgung gewährleistet.

Die Verdampferleistungen werden beeinflusst von:

- zu verdampfender Gasart,
- Umgebungsbedingungen am Standort,
- Gastemperatur am Austritt des Luftverdampfers,

- Betriebsdauer.

Bei größeren Entnahmemengen aus dem Kaltvergaser sind auch Verdampfer-Einheiten, die durch Dampf, Elektrizität oder warmes Wasser beheizt werden, üblich. Welche Versorgungsart die richtige ist, hängt vom Verfahren und von örtlichen Gegebenheiten (Entfernung zum Lieferwerk) sowie von der Bedarfsmenge ab.

Für den kleineren Bedarf an gasförmigem Stickstoff sind Hochdruckstahlflaschen die wirtschaftlichste Versorgungsart. Die Standardgrößen (50 l, 40 l und 10 l) ermöglichen beim Betriebsdruck von 200 bar bzw. 150 bar Gasinhalte von 10 m<sup>3</sup>, 6 m<sup>3</sup> bzw. 2 m<sup>3</sup> Stickstoff. Bei mittleren Verbrauchsmengen und entsprechenden betrieblichen Voraussetzungen werden zweckmäßig Flaschenbündel eingesetzt. Dabei sind in einem Gestell mehrere Einzelflaschen gebündelt, mit Hochdruckrohren verbunden und mit einem Füll- bzw. Entnahmeventil versehen. Gebräuchlich sind Ausführungen mit 12 Flaschen, die bei einem Betriebsdruck von 200 bar 120 m<sup>3</sup> Stickstoff enthalten.

Für große Gasmengen ist der Transport durch Rohrleitungen die wirtschaftlichste Versorgungsart. Auch bei sehr unterschiedlichen Abnahmemengen ist dabei eine kontinuierliche Versorgung gewährleistet. Druckspeicher und das Rohrleitungsvolumen selbst fangen periodisch wiederkehrende Bedarfsspitzen auf. Zusätzlich wird Stickstoff-flüssig in großen Tanks gespeichert und - wenn erforderlich - verdampft und in das Rohrleitungsnetz eingespeist. Die Firma Messer Griesheim betreibt daher zur Versorgung von Großverbrauchern Stickstoff-Rohrleitungsnetze, z. B. im Ruhrgebiet, im Raume Köln und im Saarland.

### **Kohlendioxid-CO<sub>2</sub>**

Ähnlich wie vorab für Stickstoff beschrieben, werden auch für Kohlendioxid-Tankanlagen nach /24/ z. B. von der Firma Buse Gase GmbH in Bochum angeboten.

Das CO<sub>2</sub> kann der Tankanlage flüssig oder gasförmig, kontinuierlich oder sporadisch entnommen werden. Die CO<sub>2</sub>-Tankanlage wird bevorzugt dort eingesetzt, wo flüssiges CO<sub>2</sub> benötigt wird oder eine ökonomische Bevorratung großer CO<sub>2</sub>-Mengen erforderlich ist. Für die Entnahme größerer Mengen gasförmigen Kohlendioxids ist der Einbau von Elektroheizungen oder außenliegenden Verdampfern vorgesehen.

Die CO<sub>2</sub>-Tankanlage nach /24/ besteht aus einem Zylinderbehälter aus tieftemperaturbeständigem Stahl, ausgelegt und geprüft nach den gültigen Sicherheitsvorschriften und den Richtlinien und Regeln der Technik, ausgerüstet mit:

- CO<sub>2</sub>-Füll-, Entnahme- und Sicherheitsarmaturen,
- einer Verwiegevorrichtung zur Kontrolle der CO<sub>2</sub>-Füll-, Entnahme und Reservemengen
- einer Kältemaschine zur Kompensation der geringen Kälteverluste,
- einer Behälterisolierung zur Verringerung von Wärmeeinwirkung,
- zusätzliche Sondereinrichtungen für spezielle Bedarfsfälle.

Nach Erstbefüllung der CO<sub>2</sub>-Tankanlage durch den CO<sub>2</sub>-Tankwagen erfolgt eine Dichtigkeitskontrolle sowie die Einstellung und Fixierung des CO<sub>2</sub>-Reservegewichtes. Bei Inbetriebnahme und in regelmäßigen vorgeschriebenen Fristen wird die Tankanlage entsprechend den einschlägigen Vorschriften von der zuständigen Aufsichtsbehörde abgenommen. Das CO<sub>2</sub> ist in der Tankanlage von 243 - 253 K (- 30 bis - 20 °C) und einem korrespondierenden Druck von 15 - 20 bar bevorratet. Geringer Wärmeeinfall durch die 150 mm starke PU-Schaum-Isolierung wird von einer Kältemaschine mit innerhalb des Behälters liegendem Wärmetauscher kompensiert. Die Kältemaschine ist druckabhängig gesteuert und kann z. B. in einem Bereich zwischen 15 und 17 bar arbeiten. Steigt der Behälterdruck über 18 bar, so wird dies über einen Kontakt mit Alarmsignal angezeigt. Bei Druckanstieg über 20 bar öffnen die Sicherheitsventile und verhindern einen weiteren Druckaufbau.

Die CO<sub>2</sub>-Tankanlage liegt auf einer eichfähigen Laufgewichts-Behälterwaage. Das höchst zulässige Füllgewicht ist auf der Anzeigenskala vermerkt. Die exakte Skalenteilung erlaubt eine genaue Erfassung des Füllgewichtes und des laufenden CO<sub>2</sub>-Verbrauches. Bei Erreichen einer Reservemenge, die an der Waage fest eingestellt ist, kann über Kontaktschalter ein optisches oder akustisches Signal ausgelöst und so auf eine erforderliche Neubestellung von CO<sub>2</sub> hingewiesen werden. Die Verwiegevorrichtung ist durch ein verschließbares Gehäuse vor unbefugtem Zugriff geschützt.

Bei Erreichen der Reservemenge wird beim zuständigen Lieferwerk der CO<sub>2</sub>-Straßentankwagen angefordert.

Zusätzliche Information, die aus /24/ erhalten wurden:

- Die großtechnische Anwendung (200 t - Bereich) von tiefkalten Flüssiggasen (Versprühen) ist sehr selten.
- Zur Löschung von Grubenbränden (z. B.: im Ruhrgebiet) besteht ein Notrufplan bei dem innerhalb von 20 - 24 h eine permanente Anlieferung von N<sub>2</sub> gesichert ist.
- Eine 50 t - Tankanlage für CO<sub>2</sub> kostet zur Zeit komplett ca. 150000,- DM (unverbindlich).  
Die größte z. Z. lieferbare Standard N<sub>2</sub>-Tankanlage (ca. 180 t N<sub>2</sub>) kostet ca. 250000,- DM (unverbindlich), wobei N<sub>2</sub>-Tankanlagen wegen des höheren Isolieraufwandes (- 196 °C) im Vergleich zu CO<sub>2</sub>-Tankanlagen (- 79 °C) etwas teurer sind.
- Bei einem CO<sub>2</sub>-Verteilungssystem ohne Vorwärmung (flüssig) ist darauf zu achten, daß der Vordruck an der Düsenmündung immer > 5 bar beträgt, da sonst Vereisungsgefahr (Verstopfung) besteht.
- Die Löslichkeit von CO<sub>2</sub> z. B. in warmem Sumpfwasser des SB stellt nach Auskunft der Buse-Fachleute /24/ kein relevantes Problem dar.
- statische Aufladungen durch Einspeisen von Inertgasen (z. B. CO<sub>2</sub>) sind den Gasexperten /24/ nicht bekannt.
- Eine Durchführung durch den Sicherheitsbehälter für eine tiefkalte Flüssiggaszufuhr (z. B. N<sub>2</sub>) erfordert den gleichen technisch hohen Isolieraufwand wie die tiefkalte Lagerung in Behältern.
- Entscheidende technische Vorteile für N<sub>2</sub> oder CO<sub>2</sub> sehen die Gasexperten in /24/ nicht. Die Preise pro Nm<sup>3</sup> für N<sub>2</sub> oder CO<sub>2</sub> liegen ähnlich. Ein Umweltproblem bei der Verwendung von CO<sub>2</sub> wird von den Gasexperten nicht gesehen, da CO<sub>2</sub> aus Rauch/Abgasen gewonnen wird, die sonst ohnehin (mit dem CO<sub>2</sub>-Anteil) in die Umwelt gelangen würden.

## **4 Anforderungen für eine Inertisierung aus Störfallszenarien**

### **4.1 Grundsätzliches**

Für die Nachinertisierung eines Sicherheitsbehälters bestehen Anforderungen, die sich aus betrieblichen Aspekten, aus beherrschten Störfällen sowie die Auslegung überschreitenden Stör- und Unfällen bis hin zum Kernschmelzen ergeben. In den nachfolgend beschriebenen Untersuchungen wird schwerpunktmäßig die Nachinertisierung unter den Randbedingungen schwerer Störfälle, die zum Kernschmelzen führen, behandelt.

Aus derartigen Szenarien ergeben sich bestimmte Anforderungen und Charakteristiken für das Konzept einer Nachinertisierung, so z. B.:

- Einsatzzeitpunkt
- Einspeiseraten und Zeitdauer
- erforderliche Gesamtmasse
- Druckaufbau im SB
- Grundlagen zur Wahl der Einspeiseorte
- örtliche und zeitliche Störfall-Lasten
- lokale Gaskonzentrationen und Temperaturverteilungen

Während zur Abschätzung der ersten vier Punkte relativ einfache, z. B. Einraum-Rechen-Programme angewendet werden können, sind zur Klärung der letzten drei Punkte detaillierte Mehrzonen-Programme zur Simulation der lokalen thermodynamischen Bedingungen erforderlich.

Es ist darauf hinzuweisen, daß der Stand der Kenntnisse zu derartigen Unfallsequenzen noch größere, nicht im Detail quantifizierbare Unsicherheiten enthält und risikoorientierte Untersuchungen für DWR-Anlagen bisher nur anlagenspezifisch (Biblis B) durchgeführt wurden.

## 4.2 SWR-Szenarien

Eine risikoorientierte Sicherheitsstudie für die in der Bundesrepublik vorhandenen Siedewasserreaktoren liegt zur Zeit noch nicht vor. Von den Betreibern der SWR-Anlagen wurde der Anlagenhersteller Siemens daher beauftragt, eine erste Analyse zur Thematik auslegungsüberschreitender Ereignisse durchzuführen. Parallel hierzu erfolgten Untersuchungen durch die GRS im Auftrag des BMU. Als Referenzanlage für die Baulinie 69 diente hierzu das Kernkraftwerk Krümmel. Für kleinere SWR-Anlagen der gleichen Baulinie wurden entsprechende Überlegungen zur Übertragbarkeit der Ergebnisse durchgeführt.

Für die Untersuchungen wurden drei Ereignisabläufe ausgewählt (siehe hierzu auch /25/), die einen "einhüllenden" Charakter für andere denkbare Unfallsequenzen aufweisen sollen. Im Hinblick auf die Wasserstoff-Problematik im Sicherheitsbehälter ist von den drei untersuchten Ereignisabläufen der "Leckstörfall" von Bedeutung. Es handelt sich hierbei um einen angenommenen Kühlmittelverluststörfall mit nachfolgendem Ausfall der Notkühlein speisung in den Reaktordruckbehälter beim Umschalten auf Kondensationskammerkühlung. Im Verlaufe eines derartigen, schweren Störfalles führt die Dampffreisetzung in das Druckabbausystem und eine relativ hohe Wasserstoff-Bildung zu einem erheblichen Druckanstieg, der den Auslegungsdruck des Sicherheitsbehälters von 4,5 bar deutlich übersteigt. Eine Wasserstoff-Verbrennung mit zusätzlicher Druck- und Temperaturerhöhung könnte hier bereits in der Frühphase zum Versagen des SB führen. Es war daher eine sicherheitsgerichtete Maßnahme, für die SWR-Anlagen in Deutschland die Vorinertisierung mit Stickstoff vorzusehen, bei der der Sauerstoffgehalt im SB auf ein Niveau herabgesetzt wird, welches die Brennbarkeit von Gasen, wie Wasserstoff, ausschließt.

Im Zeitbereich der untersuchten, möglichen Ereignisabläufe (< 20 h) ist daher eine Wasserstoffzündung durch die Vorinertisierung ausgeschlossen. Der langzeitigen Entstehung von zusätzlichen Sauerstoff- und Wasserstoff-Mengen durch die Radiolyse im Kondensationsbecken und/oder Druckkammersumpf, muß in den SWR-Anlagen durch eine ergänzende Inertisierung (die auch als Nachinertisierung bezeichnet wird) begegnet werden (siehe auch Kap. 3.2).

Die Notwendigkeit einer ergänzenden Inertisierung von SWR-Anlagen wird aus dem Wasserstoff/Sauerstoff-Überwachungssystem (siehe Kap. 2.3) abgeleitet.

Durch die Vorinertisierung, d. h. bei Störfalleintritt liegt eine abgeschlossene, vollständige Inertisierung bereits vor, ergeben sich zwangsläufig keine speziellen Anforderungen aus verschiedenen Störfallszenarien, vorausgesetzt, es tritt kein Lufteinbruch in den SB im Verlauf einer Störfallentwicklung ein.

### **4.3 DWR-Szenarien**

#### **4.3.1 Einzonen CONDRU-Rechnungen mit N<sub>2</sub>- oder CO<sub>2</sub>-Nachinertisierung**

Zu den in der Deutschen Risikostudie, Phase B analysierten Unfallabläufen mit Kernschmelzen, dem ND-(Kühlmittelverluststörfall mit Ausfall der Notkühlung) und dem ND\*-Fall (Hochdruckszenario mit der Maßnahme: Druckentlastung des Primärsystems) sind im Rahmen dieser Untersuchung orientierende Rechnungen zur Problematik einer Nachinertisierung mit dem Einraum-Rechenprogramm CONDRU /26/ durchgeführt worden. Der ND-Fall repräsentiert einen Kernschmelzunfall bei dem relativ früh ( $\leq 1$  h) Gegenmaßnahmen zur Beherrschung der Wasserstoffsituation im SB eingeleitet werden müssen. Der ND\*-Fall steht für einen Kernschmelzunfall, bei dem dagegen relativ spät Gegenmaßnahmen ( $> 3$  h) erforderlich werden.

Diese Rechnungen hatten zum Ziel, erste Anhaltswerte dafür zu erhalten, welche Einspeiseraten und Gesamtmengen an Inertgas notwendig sind, um sicherzustellen, daß eine Zündung von Wasserstoff entweder nur zu einer milden Deflagration führt, (Begrenzung der Flammenbeschleunigung durch eine Teilinertisierung) oder das Wasserstoff enthaltende Gasgemisch nicht brennbar ist. Eine weitere Randbedingung war, daß durch die Zufuhr von Inertgas nicht in der Frühphase der Unfallentwicklung bereits die Kriterien für eine Druckentlastung des Sicherheitsbehälters (Venting) erreicht werden, hier bei etwa 6 bar. Außerdem sind die Filter in den SB-Druckentlastungsstrecken nicht für eine frühzeitige Druckentlastung (höhere Aktivitätsbelastung) ausgelegt.

Eine entscheidende Frage ist der Zeitpunkt für die Einleitung einer Nachinertisierung. In den Rechnungen wurde hierfür der Zeitpunkt der ersten massiven Wasserstoff-Freisetzung in den SB angesetzt. Eine Übersicht über die bei Kernschmelzunfällen in Abhängigkeit von der Zeit gebildeten Wasserstoffmengen zeigt Bild 4.1 aus /27/. Eine derartige Wasserstoff-Freisetzung kann möglicherweise durch das vorhandene

Wasserstoff-Meßsystem erfaßt werden. Aus den Rechnungen zum ND-Pfad ergab sich der Zeitpunkt der ersten stärkeren Wasserstoff-Freisetzung zu 2100 s (ca. 0,6 h), während er für den ND\*-Pfad bei 18720 s (5,2 h) liegt (siehe Tabelle 4.2). Zu diesen Zeitpunkten wurde in den Rechnungen der Beginn einer Inertgaszufuhr simuliert. Die Rechnungen wurden für den ND\*-Pfad zum Vergleich mit den Inertgasen  $N_2$  und  $CO_2$  durchgeführt. Ferner wurde auch eine  $CO_2$ -Zufuhr beim ND-Pfad gerechnet. Eine Übersicht über ausgewählte Rechnungen ist in der Tabelle 4.2 dargestellt.

Die im folgenden dargestellten Untersuchungen wurden vorwiegend unter der Annahme einer *trockenen* Schmelze-Beton-Wechselwirkung (ohne Sumpfwassereinbruch) durchgeführt. Ein Sumpfwassereinbruch ist nach [27] für den ND-Pfad frühestens nach ca. 9 h und für den ND\*-Pfad erst nach ca. 14 h zu erwarten. Eine Inertisierungs-Maßnahme ist nur beträchtlich vor diesen Zeitpunkten sinnvoll. Ein Sumpfwassereinbruch, der eine starke Verdampfung in eine schon inertisierte Atmosphäre mitschlingt, führt zu einem kurzfristigen Erreichen des Vent-Kriteriums.

Die sich bei einer  $N_2$ -Zufuhr für den ND\*-Pfad ergebenden Druckverläufe sind für die Rechenläufe Nr. 2 und 3 (siehe Tabelle 4.2) in Bild 4.2 im Vergleich zum Referenzfall (ohne  $N_2$ -Zufuhr und ohne Sumpfwassereinbruch) dargestellt. Bild 4.3 zeigt die zugehörigen Konzentrationsverläufe im Dreistoff-Diagramm, wobei die Volumenanteile von  $CO_2$  (aus der Betonschmelze-Wechselwirkung) und  $N_2$  als zugeführtes Inertgas auf der Wasserdampf-Seite zugeschlagen wurden und das ebenfalls aus der Betonschmelze-Wechselwirkung stammende CO dem Wasserstoff zugeteilt wurde. Zu beachten ist, daß die Brennbarkeitsgrenze nur für reinen Wasserdampf gültig ist (siehe auch Bild 2.3). Brennbarkeitsgrenzen für ein Inertgasgemisch aus  $H_2O$ -Dampf,  $N_2$  und  $CO_2$  liegen z. Zt. noch nicht vor. Es ist anzumerken, daß den Rechnungen die Annahme einer gasförmigen  $N_2$ -Zufuhr mit der Einspeisetemperatur von 1 °C zugrunde liegt.

Die Bilder zeigen, daß schon mit der relativ geringen  $N_2$ -Einspeiserate von 4 kg/s eine deutliche Verbesserung der kritischen Wasserstoff-Situation im SB erreicht wird (mittlere Kurve im Dreistoff-Diagramm, Bild 4.3). Durch die  $N_2$ -Zufuhr wird jedoch ein deutlich steilerer Druckanstieg im SB verursacht (Bild 4.2), der zu einem relativ frühen Erreichen des Vent-Kriteriums führt. Im Rechenfall Nr. 2 (Tabelle 4.2) wird die  $N_2$ -Zufuhr nach Einspeisen von 200 t  $N_2$  beendet und das Vent-Kriterium relativ früh, nach 2,4 d, erreicht.

Beispielhaft für eine ND\*-Pfad-Rechnung mit Sumpfwasserkontakt sei hier der in Tabelle 4.2 aufgeführte Rechenfall 1 erwähnt, für den bei einer N<sub>2</sub>-Zufuhr von 4 kg/s schon nach 19,4 h das Vent-Kriterium erreicht wird.

Ein günstigeres Ergebnis liefert die im Dreistoffdiagramm (untere Kurve in Bild 4.3) dargestellte Einspeisemenge von 40 kg/s N<sub>2</sub>, die bereits frühzeitig weit aus dem Zündbereich führt. Die hohe N<sub>2</sub>-Einspeiserate führt jedoch zu einem starken Druckanstieg im SB, wie Bild 4.2 zeigt. Der Maximaldruck nach Beendigung der N<sub>2</sub>-Einspeisung (1 h lang N<sub>2</sub> eingespeist = insgesamt 144 t N<sub>2</sub>, siehe Tabelle 4.2) bleibt gerade unter dem Vent-Kriterium von 6 bar. Die geringere Menge von 144 t N<sub>2</sub> im Vergleich zu den in Kapitel 2.1 genannten 230 t N<sub>2</sub> ergibt sich aus der zusätzlichen Wasserdampf-Inertisierung. Das spätere Erreichen des Vent.-Kriteriums durch den weiteren Ablauf des Störfalls nach ca. 4,3 d erfüllt die Randbedingungen für eine gezielte Druckentlastung des SB im Hinblick auf einen genügend langen Zeitraum für eine Spaltproduktablagerung. Wie weitere, hier nicht dargestellte Untersuchungen zeigten, führen größere N<sub>2</sub>-Einspeiseraten, als die oben angeführten 40 kg/s, zu einem frühzeitigen Erreichen des Vent.-Kriteriums und wurden daher nicht weiter ausgewertet.

Zusammenfassend zeigen die unter vereinfachenden Bedingungen durchgeführten Untersuchungen, daß eine N<sub>2</sub>-Inertgaszufuhr, die beim ersten Auftreten einer H<sub>2</sub>-Zufuhr in den SB eingeleitet wird, geeignet scheint, eine kritische Wasserstoffsituation abzumildern, bzw. eine Zündfähigkeit des H<sub>2</sub> generell zu verhindern. Kurzfristig eingespeiste Inertgasmengen mit relativ hohen Einspeiseraten scheinen sich günstiger in Bezug auf die Druckentwicklung im SB und den Konzentrationsverlauf auszuwirken, als langfristig eingespeiste Mengen mit kleinen Einspeiseraten. Allerdings sind hohe Einspeiseraten durch das frühzeitige Erreichen des Vent-Kriteriums begrenzt. Insbesondere gilt dies auch bei zusätzlicher - später einsetzender - Sumpfwasserverdampfung.

Im wesentlichen treffen diese generellen Ergebnisse auch auf die in den Bildern 4.4 und 4.5 gezeigten Druckverläufe und Konzentrationsverläufe beim ND\*-Pfad mit zusätzlicher CO<sub>2</sub>-Inertgaseinspeisung zu. Bei den Konzentrationsverläufen wird das zusätzliche CO<sub>2</sub> aus der Inertgaszufuhr ebenso wie das aus der Beton-Schmelze-Wechselwirkung stammende CO<sub>2</sub> dem Wasserdampf zugeschlagen, während das aus der Beton-Schmelze Wechselwirkung stammende CO wiederum dem H<sub>2</sub>-Anteil zugeteilt wird.

Im Vergleich zum Inertgas  $N_2$  zeigt das Inertgas  $CO_2$  deutliche Vorteile in Bezug auf ein späteres Erreichen der Vent-Kriterien (siehe Bild 4.4 und Tabelle 4.2) als auch in Bezug auf den Konzentrationsverlauf im Dreistoff-Diagramm (Bild 4.5).

Die Bilder 4.6 und 4.7 zeigen ergänzend eine beispielhafte  $CO_2$ -Inertgaszufuhr beim Niederdruck-Kernschmelzunfall (ND-Pfad) bei dem die Inertgaszufuhr relativ früh (hier bei 2100 s) anzusetzen ist. Der Druckverlauf in Bild 4.6 zeigt ein relativ spätes Erreichen des Vent.-Kriteriums bei ca. 5,5 d. Die hier gewählte (Mindest-) Einspeiserate von 17 kg/s  $CO_2$ -Inertgas zeigt im Dreistoffdiagramm (Bild 4.7), daß sich der mittlere Konzentrationsverlauf im SB knapp an der Zündgrenze für Wasserdampf entlang bewegt. In der Praxis wäre in diesem Fall eine größere Einspeiserate mit entsprechend kurzer Einspeisedauer anzustreben (Vent-Kriterium).

Insgesamt kann aus den orientierenden Rechnungen abgeleitet werden, daß bei der Durchführung einer Nachinertisierung so früh wie möglich und in kurzer Zeit eine große Menge an Inertgas in den SB eingespeist werden sollte. Dadurch können a priori gefährliche Wasserstoffkonzentrationen bereits während der Unfallentwicklung vermieden werden. Die durch die Inertgaszufuhr bedingte Druckerhöhung sollte jedoch auf Werte begrenzt bleiben, daß nicht zusammen mit der störfallbedingten Druckerhöhung durch Wasserdampf und Temperaturerhöhung bereits in der Frühphase die Auslegungskriterien für den Sicherheitsbehälter erreicht bzw. überschritten werden. Jede Inertgaszufuhr in einen "geschlossenen" Sicherheitsbehälter stellt daher ein Wechselspiel zwischen dem Wunsch nach möglichst schneller Inertisierung und der Erfordernis einer möglichst späten, gezielten Druckentlastung des SB dar.

Bei den oben diskutierten Ergebnissen und Schlußfolgerungen ist zu beachten, daß diese orientierenden Rechnungen mit dem Einraum-Rechencode CONDRU durchgeführt wurden. Für eine Absicherung der obigen Aussagen sind vergleichende Rechnungen mit Mehrzonen-Rechencodes wie z. B. RALOC erforderlich. Vorrangig geht es bei Mehrzonen-Programmen aber um die Aussagen zur Gas- und Temperaturverteilung in den Einzelräumen des SB bei der Zufuhr von Inertgasen.

## **4.3.2 Mehrzonen RALOC-Rechnung zur N<sub>2</sub>-Nachinertisierung**

### **4.3.2.1 Beschreibung der wesentlichen Annahmen der Berechnung**

In einer ersten orientierenden Mehrzonen-Rechnung /28/ mit dem Rechenprogramm RALOC /29/ sollte die Verteilung der Gase während der Nachinertisierung in einem DWR-Sicherheitsbehälter untersucht werden. Hierfür wurde das in /27/ erarbeitete 28-Zonenmodell der Referenzanlage Biblis B verwendet und der ND\*-Kernschmelzunfall zugrunde gelegt. Parallel zur Störfallentwicklung erfolgte beim Erreichen hoher Brennelement-Temperaturen (nach ca. 19000 s) eine N<sub>2</sub>-Gaseinspeisung mit 20 kg/s über einen Zeitbereich von 5560 s. Es ist zu beachten, daß im betrachteten Zeitraum beim Kernabsturz in das untere RDB-Plenum die sogenannte Restwasserverdampfung erfolgt. In dieser Berechnung wurde der gasförmige Stickstoff mit 1 °C in eine der unteren Dampferzeuger-Zonen eingespeist. Die zur Vergasung und Aufheizung des flüssiggelagerten N<sub>2</sub> nötige Energie wurde in der gleichen Zone mit einem Energieabzug von etwa 12 MW simuliert. Beim ND\*-Unfallszenario erfolgt zunächst die Einspeisung von Dampf und H<sub>2</sub> während der schwerpunktmäßig betrachteten in-vessel-phase in einen der mittleren Dampferzeugerräume (Druckhalterabblasebehälter).

### **4.3.2.2 Wesentliche Ergebnisse der Berechnung**

Während der oben beschriebenen N<sub>2</sub>-Einspeisung wurden dem SB insgesamt 111,2 t N<sub>2</sub> zugeführt, die zu einer Druckerhöhung um etwa 1,7 bar (im Vergleich zum Störfall ohne N<sub>2</sub>-Einspeisung) auf 4,7 bar führte, wie in Bild 4.8 gezeigt wird. Die Energiefreisetzung aus den Spaltprodukten beträgt in der betrachteten Zeit etwa 7,5 MW, der SB ist im Mittel auf 120 °C aufgewärmt und der Sumpf ist mit > 200 t Wasser von 80 °C aufgefüllt. Das bedeutet, daß die zu dieser Zeit im SB vorhandene Energie ausreicht, um die Energie zur N<sub>2</sub>-Vergasung zu liefern.

Der in dieser Rechnung beschrittene Weg, den Energieabzug zur Aufheizung und Vergasung des Stickstoffs aus der Atmosphäre einer unten liegenden Zone vorzunehmen, führt aber zu sehr konkreten Konsequenzen für die lokalen H<sub>2</sub>-Konzentrationsberechnungen. So erfolgt in der unteren Dampferzeuger-Zone eine maximale Abkühlung von 125 °C auf etwa 25 °C, siehe hierzu Bild 4.9. Auch die

Nachbarzonen kühlen sich entsprechend, aber nicht so stark, ab. Der kondensierende Dampf wird vom  $N_2$  ersetzt und somit ergibt sich lokal keine kritische  $H_2$ -Situation. Die Rechnung ist von allen wesentlichen Ergebnissen her plausibel. Wie die Bilder 4.9 und 4.10 zeigen, stellt sich am Ende der In-vessel-phase eine Temperaturschichtung im SB von etwa  $80\text{ °C}$  ein. Die  $H_2$ -Konzentrationen zeigen sich zunächst sehr inhomogen, werden aber dann im Verlaufe der im RDB ablaufenden Restwasserverdampfung homogenisiert, wobei am Ende der Rechnung erneut eine Schichtung auftritt.

#### **4.3.2.3 Beurteilung der Ergebnisse dieser Rechnung und weiterführende Aspekte**

Neben dem nachteiligen Effekt der Druckerhöhung zeigen die lokalen Temperaturberechnungen prinzipiell keine Nachteile durch die Zufuhr kalten Inertgases. Hierbei ist aber zu beachten, daß nur mittlere Temperaturen für die einzelnen Räume gerechnet werden. Die  $H_2$ -Konzentrationsverläufe sind deutlich geprägt von der Restwasserverdampfung. Zu keiner Zeit und an keinem Ort der 21 berechneten SB-Zonen ergeben sich brennbare Gasgemische während der Inertisierung. Zur Darstellung der positiven Auswirkung der Inertisierung werden hier beispielhaft die Dreistoff-Diagramme für vier verschiedene Zonen in den Bildern 4.11 bis 4.14 gezeigt. In den Bildern sind die Gaskonzentrationen einmal mit - und zum anderen ohne Stickstoffeinspeisung eingetragen. Dabei wurde der inertisierende Stickstoff wie inertisierender Wasserdampf interpretiert. Es ist jedoch offensichtlich, daß für eine Zweckmäßigkeitsbewertung der Nachinertisierung weitere Mehrraum-Berechnungen unter Abdeckung verschiedenartiger Störfallspektren durchzuführen sind, insbesondere wegen der inhomogenen Gasverteilung während der Inertgaseinspeisung.

Diese erste Mehrraum-Rechnung zeigte im wesentlichen, daß eine Inertgaszuführung die Zündfähigkeit von Wasserstoff-Gasgemischen in Einzelräumen drastisch reduzieren kann. Diese Ergebnisse sind als Ergänzung zu den Aussagen zu sehen, wie sie mit den globalen Einraum-Rechnungen (siehe Kap. 4.3.1) zur Zündbarkeit des Wasserstoffs bei der Zuführung von Inertgasen getroffen wurden.

### 4.3.3 DWR-Szenarien unter Umgehung des Sicherheitsbehälters

In /27/ wird beispielhaft für die Freisetzung von Primärkühlmittel außerhalb des Sicherheitsbehälters der Störfall "Bruch einer Nachkühlleitung im Ringraum", behandelt. In diesem Fall verbleibt der Sicherheitsbehälter bis zum Durchschmelzen des Reaktordruckbehälters (RDB) unter relativ niedrigem Druck und geringen Temperaturen der Atmosphäre, da der Primärkreisinhalt, sowie die Wassermengen aus den Notkühleinrichtungen unter Umgehung des SB direkt in den Ringraum freigesetzt werden. Die während der Kernzerstörung im RDB entstehenden Wasserstoffmengen (in-vessel-phase), werden zunächst nicht in den SB freigesetzt. Erst nach dem Durchschmelzen des RDB-Bodens und dem Beginn der Reaktion von Kernschmelze mit dem Beton in der Reaktorkaverne (ex-vessel-phase), werden die Gase  $\text{CO}_2$ , CO,  $\text{H}_2$  und Wasserdampf zum größten Teil in den nahezu drucklosen SB freigesetzt. Da die freigesetzten Gasmengen relativ gering sind, baut sich im SB der Druck und die Temperatur langsam auf einen Gleichgewichtszustand (offenes System) auf. Es bleibt daher ein großer Spielraum für den Druckaufbau durch eine Inertgaszuführung. Durch eine frühzeitige Erkennung eines derartigen Störfallablaufs kann eine eindeutige und sehr früh einsetzende Inertisierungsmaßnahme, vor Durchschmelzen des RDB, eingeleitet werden. Um beim Durchschmelzen des RDB nicht mehr Spaltprodukte als unvermeidbar wegen eines Überdrucks im SB durch die Bruchstelle in den Ringraum (Umwelt) auszutragen, wäre hier eine druckneutrale **Spülung** des SB mit Inertgas **vor** dem Durchschmelzen (noch keine Spaltproduktbelastung aus dem Störfall) sinnvoll. Wegen des geringen Energieinhaltes der Atmosphäre des SB (es liegt auch nur wenig Sumpfwasser vor), könnte in diesem Fall nur eine gasförmige Einspeisung ( $t > 0 \text{ }^\circ\text{C}$ ) der Inertgase erfolgen. Zu beachten ist hierbei ferner, daß bei einem derart offenen Sicherheitsbehälter eine "Dauerinertisierung" erforderlich werden kann.

## **5 Anforderungen an eine technische Realisierung des Inertisierungskonzeptes**

### **5.1 Schalthandlungen**

Wie aus Bild 4.1 hervorgeht, kann im ungünstigsten Fall, dem ND-Pfad, bereits nach 1 Stunde Wasserstoff in großen Mengen in den SB freigesetzt werden. Spätestens zu diesem Zeitpunkt muß also Inertgas eingespeist werden können. Dazu ist wegen des Zeitbedarfs zur Vorbereitung des Einspeisens (Öffnen der Entnahmeventile, Druckregulierung, gegebenenfalls Anheizen und Inbetriebnahme der Vorwärmstrecke, Öffnen der Verteilerstrecke) etwa 15 - 20 Min vorher eine Entscheidung über die Durchführung der notwendigen Schalthandlungen zu treffen. Wegen möglicher Fehlhandlungen unter Streß sollte insgesamt etwa 1/2 Stunde zur Vorbereitung einer Einspeisung angesetzt werden. Zum Entscheidungs-Zeitpunkt endet im ND-Pfad gerade der automatisierte Störfallablauf, eine Ausweitung zu einem Störfall, der zum Kernschmelzen führt, muß zu diesem Zeitpunkt noch nicht eindeutig erkennbar sein. Da ein Störfall in der Regel aber beherrschbar bleibt, sollte eine Inertisierung wegen möglicher negativer Auswirkungen zunächst unterbleiben (Druckaufbau, Leckagen, lokale Temperaturprobleme bei Kalteinspeisung sowie Korrosionsprobleme bei CO<sub>2</sub>).

Eine endgültige Entscheidung für oder gegen eine Nachinertisierung ist daher zu einem frühen Zeitpunkt immer problematisch.

Es können jedoch Vorbereitungen für eine Inertisierung bereits zu einem frühen Zeitpunkt getroffen werden, die endgültige Entscheidung zur Einspeisung von Inertgas in den SB aber erst aufgrund vorliegender, eindeutiger Kriterien erfolgen, wie Füllstand im RDB niedrig, Temperaturen am Kernaustritt hoch, Einspeisung von Notkühlwasser in den RDB unterbrochen u. ä.. Dieses Verfahren bietet sich besonders für Szenarien wie den ND\*-Fall an, in denen ausreichend Zeit für eine Entscheidung zur Einspeisung von Inertgas zur Verfügung steht.

Der Durchführung einer Nachinertisierung mit Handmaßnahmen steht die vollautomatische Einleitung und Überwachung gegenüber. Sie entlastet die Operateure von einer fragwürdigen Entscheidung in einer streßerfüllten frühen Störfallphase. Die Anregung kann von den allgemeinen Störfallsignalen oder vorliegenden Kriterien abgeleitet werden. Im ersteren Fall findet die Inertisierung bei allen, auch den

beherrschen, Störfällen statt. Dieses Verfahren bedarf aber detaillierter Untersuchungen zur Verträglichkeit mit dem bestehenden Sicherheitskonzept. Eine vollautomatische Einspeisung muß gegen Fehleinspeisung bei Betrieb, bei Wiederholungsprüfungen und bei (kleineren) Störfällen abgesichert werden. Im zweiten Fall müssen die Schalthandlungen, z. B. Anwärmung des Verdampfers, in der kurzen Zeit zwischen dem Vorliegen eines eindeutigen Kriteriums und der ersten Freisetzung von Wasserstoff erfolgen. Diese Zeit ist nach derzeitiger Kenntnis eng begrenzt, so daß eine kurzzeitige Überschneidung von Wasserstofffreisetzung und nicht inertisierter Umgebung zu erwarten ist.

Zwischen einer **vollautomatischen Einspeisung** und derjenigen, die **nur durch Handmaßnahmen** erfolgt, liegt die **automatische Einspeisevorbereitung** zu Beginn eines jeden Störfalles. Der Einspeisebeginn kann in der Folge von Hand je nach Störfallverlauf und bei Vorliegen eindeutiger Kriterien eingeleitet werden. Die Entscheidung zum Einspeisen kann somit unmittelbar vor dem notwendigen Einspeisezeitpunkt getroffen werden.

Zur Beendigung der Nachinertisierung können die notwendige Einspeisezeit (etwa 1 Stunde), die Einspeisemenge oder das Ergebnis von Probenahmen als Kriterium herangezogen werden. Es muß jedoch wegen eines eventuell auftretenden, unzulässigen Druckaufbaus sichergestellt werden, daß die maximale Menge nicht überschritten bzw. die eingespeiste Menge Inertgas begrenzt werden kann. Dabei sind auch offen klemmende Ventile (z. B. durch Vereisung) zu berücksichtigen. Eine Mengenbegrenzung durch einzeln zuschaltbare Behälter (z. B. 3 x 50 %, 5 x 25 %) sollte in entsprechende Überlegungen mit einbezogen werden.

Insgesamt sollte das System so einfach und übersichtlich wie möglich zu bedienen sein. Bei einer CO<sub>2</sub>-Inertisierung reduziert sich der erforderliche Schaltaufwand gegenüber der Nutzung von N<sub>2</sub>.

## 5.2 Inertgaseinspeisung

Werden zur Inertgaszufuhr in den SB bestehende Systeme benutzt, ist eine Vorwärmung des Inertgases auf die Normalbetriebsbedingungen des SB erforderlich (15 - 20 °C, ~ 1 bar), um bei der Einspeisung deren Auslegungsgrenzen nicht zu

überschreiten. Diese Vorgehensweise wurde für die N<sub>2</sub>-Vorinertisierung von SWR-Anlagen in der BRD gewählt.

Bei einer Flüssiggaseinspeisung (- 79 °C) von CO<sub>2</sub> muß in einem im SB vorhandenen CO<sub>2</sub>-Verteilungssystem immer ein Vordruck von > 5 bar vorliegen, um Vereisungen im Verteilungssystem zu verhindern. Die Einspeisemenge an CO<sub>2</sub> kann hierdurch beeinträchtigt werden. Ferner muß gewährleistet sein, daß z. B. ein Verteilungssystem im SB nicht durch einen vorangegangenen Störfall selbst beschädigt oder in der Funktion beeinträchtigt wird.

Als Einspeiseort kommen vorrangig die Anlagen- und Betriebsräume in Betracht. Eine Einspeisung in die Anlagenräume erfolgt in unmittelbarer Nähe des möglichen H<sub>2</sub>-Freisetzungsortes und führt dort zu schneller Inertisierung. Wenn die Inertgase kalt einströmen, kann eine Gasschichtung auftreten, bei der sich die Inertgase im unteren Bereich (Anlagenräume) und der Wasserstoff zusammen mit der Luft im oberen Bereich (Betriebsräume) befinden. Vermischungseinrichtungen (Energiebedarf!) sind gegebenenfalls erforderlich. Dieses bedarf detaillierter Untersuchungen, u. a. auch zur Gasverteilung mit einem Mehrzonen-Modell (Typ RALOC). Die Einspeisung kalter Inertgase muß so erfolgen, daß keine Ventile, Motoren, Rohrleitungen etc. direkt angestrahlt werden, die für die Störfallbeherrschung notwendig sind.

Eine Einspeisung in die oberen Betriebsräume ist u. U. vorteilhafter, da die kalten Inertgase bei einem hoch liegenden Einspeiseort eine starke Konvektion mit entsprechender Vermischung anfangen. Voraussetzung dafür sind genügend große Verbindungsöffnungen zwischen Betriebs- und Anlagenräumen. Die vorhandenen Druckentlastungsöffnungen sind u. U. nicht durch den vorangegangenen Störfall voll geöffnet (kleines Leck, V-Sequenz, Klappen fallen wieder zu), so daß eine aktive Öffnungsmaßnahme notwendig wird.

### **5.3 Vorratshaltung**

Bei der Lagerung großer Inertgasmengen (im Bereich von 200 t) kann es aus mehreren Gründen vorteilhafter sein, diese Menge auf mehrere kleinere Behälter aufzuteilen. Durch jeweiliges getrenntes zuschalten ist so z. B. eine bessere Kontrolle (Überspeisung, Druckaufbau im SB) gegeben. Durch eine entsprechend große Anzahl von Einzelbehältern (Reservevorratshaltung) kann bei Ausfall eines Behälters (z. B.

Ventilöffnung versagt) immer noch eine ausreichende Menge Inertgas aus den übrigen Behältern in der erforderlichen Zeitspanne eingespeist werden. Mit zunehmender Behältergröße steigen die Verdampfungsverluste stark an, wobei jedoch mehrere kleinere Behälter wiederum größere Verluste aufweisen als ein großer Behälter mit gleicher Menge. Kurzfristige Nachfüllungen sind daher erforderlich. Je nach örtlicher Lage des Kernkraftwerkes wäre u. a. auch ein Anschluß an ein z. B. wie im Ruhrgebiet und im Raum Köln vorhandenes Pipeline-Netz für  $N_2$  denkbar. Die kurzzeitig erforderlichen  $N_2$ -Mengen (gasförmig) sind durch die große Kapazität der Pipeline gegeben (siehe auch Kap. 3.2, 3.3). Die Lagerung von  $CO_2$  ist gegenüber  $N_2$  günstiger, da Verdampfungsverluste durch relativ kleine Kühlaggregate aufgefangen werden können (siehe hierzu auch Kapitel 3.3, Tabellen 3.2, 3.3).

## **6 Gegenüberstellung von Vor- und Nachteilen zur Thematik der Nachinertisierung**

Dieses Kapitel bildet die Einleitung zu Kapitel 9, in dem die Ergebnisse der Recherchen und Untersuchungen, wie sie in den vorangegangenen Kapiteln ausführlicher beschrieben wurden, in übersichtlichen Listen über offensichtliche Vor- und Nachteile einer Nachinertisierung zusammengefaßt werden. Die Kopf-Beschriftung der jeweiligen Tabelle weist auf deren Thematik hin.

Bei der Gegenüberstellung der einzelnen Vor- und Nachteile kann es vorkommen, daß die Argumente der Plus- oder Minusseite fließend ineinander übergehen, wie z. B. der Nachteil einer Sumpfwasserverdampfung auf ein früheres Erreichen des Vent-Kriteriums von dem Vorteil der zusätzlichen Wasserdampf-Inertisierung überdeckt wird.

Im einzelnen wurden folgende Tabellen erstellt:

- Tabelle 6.1: Nachinertisierung, allgemein
- Tabelle 6.2: Auswahl CO<sub>2</sub> und N<sub>2</sub>
- Tabelle 6.3: Flüssige oder gasförmige Einspeisung in den SB
- Tabelle 6.4: Inertgas-Lagerung innerhalb/außerhalb des SB
- Tabelle 6.5: Erforderliche Schalthandlungen
- Tabelle 6.7: Einspeiseort

Es ist darauf hinzuweisen, daß diese Tabellen nicht den Anspruch auf Vollständigkeit erheben. Sie sind dafür vorgesehen, einen Überblick zu den verschiedenen Teilaspekten der Nachinertisierung zu gewinnen. Einflüsse von anlagentechnischen Besonderheiten und Störfallablauf, aber auch Aspekte der normalen Betriebsführung konnten nur sehr oberflächlich bzw. gar nicht erfaßt werden.

Spezielle Spezifikationen für ein Inertisierungssystem bedürfen einer wesentlich detaillierteren Untersuchung über Vor- und Nachteile.

## 7 Zusammenfassung

In diesem Bericht wurde versucht, Bekanntes und weniger Bekanntes zur Thematik "Nachinertisierung von Volldrucksicherheitsbehältern" systematisch darzustellen. Angefangen von grundsätzlichen Überlegungen und der Darstellung der in verschiedenen Publikationen vorgestellten, möglichen Konzepte, zeigt dieser Bericht den derzeitigen Status auf, bis hin zu den Anforderungen an ein derartiges Konzept aus Erkenntnissen zu möglichen Störfallabläufen und der Gegenüberstellung verschiedenartiger Vor- und Nachteile einzelner Strategien, Inertgase usw..

In Ergänzung hierzu wurden abschätzende Berechnungen mit den Thermohydraulik-Programmen CONDRU und RALOC durchgeführt, um orientierende Daten über z. B. erforderliche Massen an Inertgasen, Einspeiseraten und Druckverlauf im SB für die Einschätzung von Effektivität und Durchführbarkeit derartiger Maßnahmen verfügbar zu haben.

Im Verlaufe der Recherchen zu diesem Bericht ergaben sich verschiedene, offene Fragestellungen, die noch einer detaillierteren Untersuchung bedürfen, wie z. B.

- Kriterien zur Vorbereitung und Durchführung einer Inertisierung, abhängig vom Störfalltyp.
- Was ist, wenn das Nachinertisierungssystem ausfällt oder - in einem engen Zeitfenster (ND-Pfad) - nicht aktiviert werden kann?
- Absicherung des Inertisierungssystems gegen unbeabsichtigte Inbetriebsetzung.
- Lokale Auswirkungen einer Kaltgas-Einspeisung auf sicherheitstechnisch relevante Komponenten im SB.
- Zündgrenzen für Gasgemische unterschiedlicher Temperaturen und Drücke (z. B. H<sub>2</sub>-CO<sub>2</sub>-Dampf-Luft).

Insbesondere für die Strategie einer nur teilweisen Nachinertisierung, wodurch hochturbulente Deflagrationen und Detonationen verhindert werden sollen, ist die Übertragbarkeit vorliegender Versuchsergebnisse zur lokalen Flammenbeschleunigung auf reale Verhältnisse in einem Volldrucksicherheitsbehälter bisher nicht gesichert. Hierfür und auch zu weiteren Teilfragen besteht ein erheblicher

Forschungsbedarf für den Fall, daß eine derartige Strategie technisch umgesetzt werden sollte.

Als ein erstes Fazit können folgende Feststellungen getroffen werden:

1. die technische Realisierung einer Nachinertisierung ist nicht fraglich. Hierdurch können H<sub>2</sub>-Verbrennungen sicher verhindert werden,
2. als nutzbares Inertgas weist CO<sub>2</sub> etliche Vorteile gegenüber N<sub>2</sub> auf,
3. eine Maßnahme zur Nachinertisierung kann nicht unabhängig von der Unfallentwicklung durchgeführt werden. Eindeutige Kriterien für die Aktivierung eines Inertisierungssystems bedürfen noch umfangreicher Untersuchungen,
4. nach einer vollständigen Inertisierung der Atmosphäre wird wesentlich früher der Auslegungsdruck für den SB erreicht bzw. überschritten. Hierdurch ergeben sich verschärfende Bedingungen für die gefilterte Druckentlastung (z. B. Filterauslegung),
5. die Problematik langzeitiger Leckagen wird durch eine Inertisierung (erhöhter Druck) verschärft,
6. mit einer teilweisen Nachinertisierung können die Folgen möglicher H<sub>2</sub>-Verbrennungen begrenzt werden, Verbrennungen sind aber grundsätzlich möglich,
7. eine einmalige, vollständige Inertisierung bildet langfristig (Wochen, Monate) keinen Vollschutz gegen H<sub>2</sub>-Verbrennungen. Die O<sub>2</sub>-Bildung durch Radiolyse im Sumpfwasser erfordert eine O<sub>2</sub>-Kontrolle und gegebenenfalls eine wiederholte Inertgaseinspeisung.

## 8 Literatur und Unterlagen

- /1/ W. Baukal, A. Köhling, G. Langer, E. Poeschel  
Battelle-Institut E.V., Frankfurt a. Main  
Möglichkeiten zur Wasserstoffbeseitigung  
Juni 1981, BF-R-64.239-1, BMI-1984-033
- /2/ A.L. Berlad, R. Jaung and W.T. Pratt  
Department of Nuclear Energy, Brookhaven National Laboratory,  
Upton, New York 11973  
Mitigation Effects of Continuously Pressurized, Partially Inerted Contain-  
ment Building Atmospheres  
Proceedings of the Second International Conference on the Impact of Hy-  
drogen on Water Reactor Safety  
Albuquerque, New Mexico  
October 3-7, 1982
- /3/ M.A. Harris - Bechtel Power Corp.  
S.H. Hobbs - Mississippi Power & Light  
D. H. Ashton - Bechtel Power Corp.  
A Technical Evaluation of a Post-Accident CO<sub>2</sub> Inerting Control System  
Proceedings 2nd International Workshop on the Impact of Hydrogen on  
Water Reactor Safety, Albuquerque, New Mexico,  
October 3 - 7, 1982 (preprints)
- /4/ G. Langer, A. Köhling, H. Nikodem, W. Baukal  
Battelle-Institut E.V., Frankfurt a. Main  
Möglichkeiten zur Wasserstoffbeseitigung,  
Phase II: Wasserstoffbeherrschung bei hypothetischen schweren Unfällen  
in Druckwasserreaktoren  
Dezember 1982, BF-R-64.940-1, BMI-1984-02721

- /5/ G. Langer, E. Schimetschka, W. Baukal  
Battelle-Institut E.V., Frankfurt a. Main  
Möglichkeiten zur Wasserstoffbeseitigung  
Phase III: Ausgewählte Maßnahmen zur Wasserstoffbeherrschung bei hypothetischen Unfällen im Druckwasserreaktor  
Dezember 1983, BLEV-R-65.411-1, BMU-1986-134
- /6/ G. Langer, H.G. Scheibel W. Baukal  
Battelle-Institut E.V., Frankfurt a. Main  
Möglichkeiten zur Wasserstoffbeseitigung  
Phase III/2: Gesteuerte Zündung als Maßnahme zur Wasserstoffbeherrschung bei hypothetischen schweren Unfällen in Druckwasserreaktoren  
März 1985, BF-R-65.836-1, BMI-1985-086
- /7/ B. Covelli  
Tecova AG, CH-5610 Wohlen  
Beschreibung eines Ertüchtigungskonzeptes zur Verhinderung eines Überdruckversagens des Sicherheitsbehälters  
April 1985
- /8/ G. Langer, W. Baukal, H.G. Scheibel  
Battelle-Institut E.V., Frankfurt a. Main  
Möglichkeiten zur Wasserstoffbeseitigung  
Phase III/3: Abschließende Beurteilung des Potentials der gesteuerten Zündung als Maßnahme des Wasserstoffproblems bei hypothetischen schweren Unfällen in Druckwasserreaktoren  
März 1986, BF-R-66.246-1, BMU-1986-114
- /9/ H. Karwat  
Präzisierung eines Arbeitsvorschlages zur Untersuchung der Nachinertisierung von DWR-Sicherheitsbehältern  
Aktenvermerk vom 8.8.1988

- /10/ H. Karwat  
Bewertung von Zündkerzen zur Beseitigung einer Wasserstoffexplosion  
und Arbeitsvorschlag zur Untersuchung der Nachinertisierung von DWR-  
Sicherheitsbehältern.  
Bericht zur 44. Sitzung des RSK-Ausschusses "Spaltproduktrückhaltung"  
am 08.11.1988
- /11/ H. Jahn  
Bewertung des "Deliberate Ignition Concept" und Möglichkeiten zur  
Wasserstoff-Beherrschung  
Bericht zur 44. Sitzung des RSK-Ausschusses "Spaltproduktrückhaltung"  
am 08.11.1988
- /12/ H. Karwat  
Arbeitsvorschlag zur Untersuchung der Nachinertisierung von DWR-  
Sicherheitsbehältern  
Besprechung im BMfT 18.10.1989
- /13/ H. Karwat  
Zündkerzen zur Beseitigung des Risikos einer Wasserstoffexplosion, eine  
kritische Bewertung. Nov. 1989  
Vorlage für die 98. Sitzung des RSK-Ausschusses Leichtwasserreaktoren  
am 05.12.1989
- /14/ H. Karwat  
Verfahren zur Beseitigung der Gefahr einer Wasserstoffexplosion im Si-  
cherheitsbehälter von Druckwasserreaktoren, Experimentelles Programm  
zum Zündverfahren  
Brief vom 31.05.1990 an das BMU
- /15/ H. Karwat  
Lehrstuhl für Reaktordynamik und Reaktorsicherheit, Technische Univer-  
sität München, München, Fed. Rep. Germany  
Ignitors to mitigate the Risk of Hydrogen Explosions - A Critical Review  
Nuclear Engineering and Design 118 (1990) 267-271  
North-Holland

- /16/ H. Karwat  
Unfallmanagement bei schweren Störfällen  
Atomwirtschaft, Juli 1991
- /17/ H. Jahn  
Wasserstoff-Präventiv-Maßnahmen  
Vorschläge zur Nachinertisierung bei schweren Unfällen für bestehende  
und künftige Kernkraftwerke  
September 1991
- /18/ H. Jahn  
Möglichkeiten und Probleme der Nachinertisierung von DWR-  
Sicherheitsbehältern  
Tischvorlage zur 5. Sitzung der ad hoc-Arbeitsgruppe "Wasserstoff" des  
RSK-Ausschusses Leichtwasserreaktoren  
Bonn, 15. Oktober 1991
- /19/ J. G. Visser  
Inertisation in containments of nuclear power plants - a feasibility study  
PML 1991-C, October 1991, Draft
- /20/ D. W. Stamps et. al.  
Hydrogen-Air-Diluent Detonation Study for Nuclear Reactor Safety Analy-  
ses  
Sandia National Laboratories  
SAND 89-2398, NUREG/CR-5525
- /21/ Empfehlungen der Reaktor-Sicherheitskommission auf ihrer 218. Sitzung  
am 17. Dezember 1986:  
Überprüfung der Sicherheit der Kernkraftwerke mit Leichtwasserreaktoren  
in der Bundesrepublik Deutschland  
Bundesanzeiger Nr. 52, 17.3.1987
- /22/ Besprechung am 07.11.1991 im Kernkraftwerk Philippsburg: Daten, Unter-  
lagen und Erfahrungen bei der Vorinertisierung bei SWR-Anlagen

- /23/      Unterlagen, Auskünfte und Prospekte der Firma Technische Gase-Werke GmbH, erhalten beim Besuch am 30.10.1991 in O-1139 Berlin, Schnellerstr. 6-13
- /24/      Unterlagen, Auskünfte und Prospekte der Firma Messer-Griesheim und Buse Gase GmbH, erhalten beim Besuch am 28.11.1991 in Hürth bei Köln
- /25/      TÜV Norddeutschland  
Untersuchungen zu Ereignisabläufen mit Kernschmelzen und Aktivitätsfreisetzungen in den DWR-Anlagen KKS und KBR sowie in den SWR-Anlagen KKB und KKK  
Berichtsentwurf 50-85-001 vom 12.1985
- /26/      M. Tiltmann, B. Hüttermann  
Gesellschaft für Reaktorsicherheit (GRS) mbH  
Beschreibung des Rechenprogramms CONDRU-4  
Auftragsbericht GRS-A-124  
(März 1978)
- /27/      Gesellschaft für Reaktorsicherheit (GRS) mbH:  
Deutsche Risikostudie Kernkraftwerke, Phase B  
Hrsg.: Der Bundesminister für Forschung und Technologie  
Verlag TÜV Rheinland, Köln, 1990
- /28/      B. Hüttermann  
Technische Notiz TN-HUE-1/90  
RALOC-Rechnung zum ND\*-Fall mit N<sub>2</sub>-Inertisierung,  
Januar 1990, Gesellschaft für Reaktorsicherheit
- /29/      H. Jahn, E. Hofer  
Description of the MOD 2/85 Version of the RALOC/FIPLOC family  
Part 2: Physical modelling of thermal hydraulics and integration methods  
GRS-A-1426 (März 1988)

- /30/ Hydrogen in Water-Cooled Nuclear Power Reactors, DRAFT  
International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria and  
Commission of the European Communities  
Brussels, Belgium; Vienna, Austria  
December 1990
- /31/ R. P. Prior, P. N. Kirby, R.J. Lutz Jr.  
Westinghouse Nuclear and Advanced Technology Division,  
Brussels, Belgium und Pittsburgh, USA  
M. Alt  
Gemeinschaftskernkraftwerk Neckar GmbH, Neckarswestheim, Germany  
Severe accident analysis of a 1300 MWe PWR to address the hydrogen  
issue  
Nuclear Engineering and Design 130 (1991) 51-58  
North-Holland
- /32/ Blase/Hill E443, Siemens/KWU Offenbach  
Inertisierung des Reaktorsicherheitsbehälters von Druckwasserreaktoren.  
Tischvorlage zur Besprechung zwischen GRS und KWU am 21.11.1991  
bei der KWU in Offenbach
- /33/ Blase/Hill, E443, Siemens/KWU Offenbach  
Bewertung von Inertisierungskonzepten als Maßnahmen zur  
H<sub>2</sub>-Beherrschung  
Siemens-Arbeitsbericht KWU E443/91/0046 vom 21.11.1991

## 9 Tabellen

**Tabelle 2.1** Überlegungen zur Nachinertisierung von Volldrucksicherheitsbehältern

	Battelle 1982/BMI Vorhaben SR 212 /1, 4, 5, 6, 8/			Bechtel 1982 /3/	Karwat 1988 * /9, 12/	Jahn 1991 /17, 18/		Siemens 1991 /32, 33/		
Inertgas	CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub> (CO <sub>2</sub> )	N <sub>2</sub> (CO <sub>2</sub> )	N <sub>2</sub> (CO <sub>2</sub> )	N <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>
Art der Inert.	Zuspeisung	Zuspeisung	Zuspeisung	Zuspeisung	Zuspeisung	Zuspeisung	Spülen	Zuspeisung	Zuspeisung	Zuspeisung Teilinertisierung
Beginn	30 min	30 min	30 min	Wassersp. < OK Kern	15 - 20 min	> 30 min	> 30 min	1,5 h	1,5 h	1,5 h
Dauer		1 h	1 h	0,5 h		0,5 - 1,5 h	0,5 - 1,5 h	1 h	1 h	1 h
Einsp.-Rate							30 kg/s	202.500 m <sup>3</sup> /h	105.600 m <sup>3</sup> /h	22.500 m <sup>3</sup> /h
Einsp.-Menge	105.000 m <sup>3</sup> 210.000 kg	210.000 m <sup>3</sup> 265.000 kg	210.000 m <sup>3</sup> 265.000 kg	bis 50 Vol.- % CO <sub>2</sub> im SB						
Zus.-Druck	2,0 bar	4,8 bar	4,8 bar	1,9 bar			kein zus. Dr.		1,7 bar	0,7 bar
Einsp.-Leitg.		DN 300	DN 300				DN 600	DN 400	DN 300	DN 200
Verteilung	Leitungsnetz mit Düsen			Düsen, Pool	Kuppel oder Anlagenr.	Leitung u. a. in den SB-Sumpf		Düsen in Anlagen- und Kuppelr.		
Betätigung	von Hand			von Hand		Von Hand				
Venteitung					wie vorhanden		DN 600	wie vorhanden		
Lagerung	außerhalb SB				in SB-Kuppel	außerhalb des SB		außerhalb des SB		
Zustd. des Gases	flüssig 20 bar, -20 °C	gasförmig 40 bar	flüssig	flüssig	flüssig 6, 18, 22 bar	flüssig	flüssig	flüssig, 430 m <sup>3</sup> 30 bar, -155°C	flüssig, 200 m <sup>3</sup> 50 bar, 15 °C	flüssig, 50 m <sup>3</sup> 50 bar, 15 °C
Hilfseinrichtung	keine	keine	Verdampfer	keine		He-Druck-Speicher		Verdampfer		
Verdampfungswärme	35 MWh aus Störfallenergie	keine	15 MWh	aus Störfall- energiefreis.	aus Störfall- Energiefreis.	aus Störfall-Energiefreisetzung		1.300 l Öl	800 l Öl	200 l Öl
Verdampfungslleistung								18 MW	11,3 MW	2,8 MW

\* für einen Versuchsvorschlag HDR

**Tabelle 2.2:** Technische Daten zur Vorinertisierung der Siedewasser-Reaktoren (SWR)

Kernkraftwerksanlage	Freies Volumen		N <sub>2</sub> -Bedarf		N <sub>2</sub> -Bevorratung		N <sub>2</sub> -Zuspel-sestrom 20 °C, 1 bar m <sup>3</sup> /h	Zeitbedarf für N <sub>2</sub> -Inertisierung		Zeitbedarf für Deinertisierung		Bemerkungen
	KK m <sup>3</sup>	DK+SAR m <sup>3</sup>	KK m <sup>3</sup>	DK+SAR m <sup>3</sup>	max. m <sup>3</sup>	min. m <sup>3</sup>		KK h	DK+SAR h	KK h	DK+SAR h	
KWW, Würiggassen	2700	3700	6400	9100	21000	11000	1200	6	8	6	2	Stationäre Flüssig-N <sub>2</sub> -Lagerung
KKB, Brunsbüttel	2284	3816	3800	6400	8300		800	6,5	8	1,5	2	Stationäre Flüssig-N <sub>2</sub> -Lagerung nur zum Nachinertisieren.*
KKI, Isar	2252	3816	3734	6328	17300		1200	19	6	1,5	3	Stationäre Flüssig-N <sub>2</sub> -Lagerung
KKP 1, Philippsburg	2172	3700	3600	6136	21270	15500	1500	2,4	4,1	1,5	3	Stationäre Flüssig-N <sub>2</sub> -Lagerung
KKK, Krümmel	2714	4970	4000	7000	8300		1500	3	4	6	3	Stationäre Flüssig-N <sub>2</sub> -Lagerung nur zum Nachinertisieren.*
KRB II, Gundremmingen	6000	Nur KK wird inertisiert	18000	-	18000		1000	< 24	Nur KK wird inertisiert	5	Nur KK wird inertisiert	Stationäre Flüssig-N <sub>2</sub> -Lagerung

\* Beim Neu-Inertisieren wird aus mobilen Tankwagen die stationäre Anlage nachgefüllt.

**Tabelle 3.1** Stoffdaten für Kohlendioxyd und Stickstoff

Eigenschaft	Dimension	CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>
Molekulargewicht	kg/kmol	44.01	28.02
Gaskonstante	kJ/kg K	0.19	0.3
Normdichte (bei 0°C und 1013 mbar)	kg/m <sup>3</sup>	1.98	1.25
Schmelztemperatur	°C	-56.6	-210.5
Schmelzenthalpie	kJ/kg	184	25.75
Sättigungstemperatur (bei 1013 mbar)	°C	-78.2	-195.7
Kritische Temperatur	°C	31.1	147.16
Kritischer Druck	bar	73.92	33.93
Wahre spezifische Wärme (bei 25°C, 1 bar )	kJ/kg K	0.85	1.04
Wärmeleitfähigkeit (bei 25°C, 1 bar)	W/m K	0.02	0.03
Dynam. Viskosität (bei 25°C, 1 bar)	10 <sup>-5</sup> Ns/m <sup>2</sup>	1.48	1.78

**Tabelle 3.2** Lagerung von Inertgasen in Druckflaschen (50 l - Standard-Flasche)

Angaben	Dimension	CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>
50 l - Flasche (Standard), t <sub>max</sub> = 57 °C, p=200 bar	kg pro Flasche	37.23	9.51
Notwendige Anzahl der Flaschen bei einer Mindest-Inertgasmenge von 191 t für CO <sub>2</sub> und 227 t für N <sub>2</sub>	-	5 700	26 500
Massenstrom bei einer Einspeisezeit von 1 Stunde	kg/s	53	63
Endtemperatur nach Entleerung der Flasche (ohne zusätzliche Beheizung der Flasche)	°C	-36	-156
Enddruck nach Entleeren der Flasche	bar	11.6	6
Leitungsdurchmesser, ca. (bezogen auf Enddruck)	mm	160	300
Strömungsgeschwindigkeit, ca.	m/s	48	53
Abmessungen der Flaschen-Lagerhalle, ca. BxHxL	m	9x12x60	9x12x270

**Tabelle 3.3** Lagerung von Inertgasen in Tankanlagen

Angaben	Dimension	CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>
Lagerungsdruck, ca.	bar	15	15
Lagerungstemperatur, ca.	°C	-28	-162
größte Standard-Tankgröße-Inhalt Breite x Höhe	m <sup>3</sup> m		238 5 x 18,1
Notwendiges Tankvolumen bei 80 %iger Entleerung (bei CO <sub>2</sub> : ohne Eisbildung im Tank) bezogen auf die notwendigen Inertgasmengen von 191 t CO <sub>2</sub> und 227 t N <sub>2</sub>	m <sup>3</sup>	235	483
Verdampfungsverlust (große Behälter)	kg/d %/d	0 Kältemaschine	500-1260 0,5 - 1 (0,2 - 0,5)
Notwendige Kälteleistung (nur für CO <sub>2</sub> ), ca.	KW	6	-

**Tabelle 3.4** Daten für gasförmige oder flüssige Inertgaseinspeisung aus Tankanlagen (siehe Tabelle 3.3)

Angaben	Dimension	CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>
<b>gasförmige Einspeisung</b>			
Massenstrom bezogen auf die notwendigen Mengen an Inertgas: bei CO <sub>2</sub> = 191 t, bei N <sub>2</sub> = 227 t und Entleerung in 1 h	kg/s	53	63
Verdampfer-Leistung (Aufwärmung der Inertgase auf +0°C)	MW	18.2	21
Notwendige Leitungsdurchmesser, ca.	mm	300	500
Strömungsgeschwindigkeit, ca.	m/s	58	53
<b>flüssige Einspeisung</b>			
Endtemperatur im Vorratstank	°C	-44	-177
Enddruck im Vorratstank	bar	8.5	6.1
Notwendige Leitungsdurchmesser, ca.	mm	160	160
Strömungsgeschwindigkeit, ca.	m/s	14	30

**Tabelle 4.1** Zeitangaben zu Unfallabläufen mit Kernschmelzen

Kernschmelzfall	Zeit in min ab Störfalleintritt		
	Freilegung des Kerns	Beginn Kernschmelzen	Versagen Reaktordruckbehälter
Kühlmittelverluststörfall mit Ausfall der Notkühlung (ND-Fall)	< 1	55	120
Nicht beherrschter Notstromfall (HD-Fall)	84	110	140
Ausfall der Dampferzeuger-Speisewasserversorgung mit der Maßnahme: Primärseitige Druckentlastung (ND*-Fall)	285	330	410
Bruch einer Nachkühlleitung im Ringraum	< 8	80	140

**Tabelle 4.2** Orientierende Rechnungen mit dem Einraum-Rechencode CONDRU zu Kernschmelzunfällen mit Inertgaszufuhr

Lfd. Nr.	Rechenfall	Inertgas	Beginn der Inertgas-Einspeisung h	Inertgas-Einspeiserate kg/s	Gesamte eingespeiste Inertgas-Menge kg	Zeitpunkt des Erreichens von 6 bar im SB (Vent.-Kriterium) h	Zündung: <sup>1)</sup> 0= nicht möglich 1= Grenzbereich 2= möglich	Bemerkung
1	ND*-Pfad mit Sumpf-Kontakt	N <sub>2</sub>	5.2	4	20 500	19.4	1	Vent.-Kriterium wird früher durch N <sub>2</sub> -Einspeisung erreicht
2	ND*-Pfad ohne Sumpf-Kontakt	N <sub>2</sub>	5.2	4	200 000	58.4	1	Vent.-Kriterium wird durch Störfall (+ N <sub>2</sub> -Einsp.) erreicht Einspeise-Ende: 68720 s
3	ND*-Pfad ohne Sumpf-Kontakt	N <sub>2</sub>	5.2	40 (1h lang)	144 000	104.2	0	Vent.-Kriterium wird durch Störfall (+ N <sub>2</sub> -Einsp.) erreicht Einspeise-Ende: 22320 s
4	ND*-Pfad ohne Sumpf-Kontakt	CO <sub>2</sub>	5.2	7	115 000	166.7	1	Vent.-Kriterium wird durch Störfall (+ CO <sub>2</sub> -Einsp.) erreicht Einspeise-Ende: 35187 s
5	ND*-Pfad ohne Sumpf-Kontakt	CO <sub>2</sub>	5.2	50 (1h lang)	180 000	123.6	0	Vent.-Kriterium wird durch Störfall (+ CO <sub>2</sub> -Einsp.) erreicht Einspeise-Ende: 22320 s
6	ND-Pfad ohne Sumpf-Kontakt	CO <sub>2</sub>	0.6	17	142 500	133.3	1	Vent.-Kriterium wird durch Störfall (+ CO <sub>2</sub> -Einsp.) erreicht Einspeise-Ende: 10482 s

<sup>1)</sup> homogene Durchmischung im SB!

**Tabelle 6.1** Nachinertisierung, allgemein

<b>Vorteile</b>	<b>Nachteile</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>- ausreichende Inertgaszufuhr vermindert den Volumenanteil des Sauerstoffs in der SB-Atmosphäre, dadurch ist das Gasgemisch nicht mehr zündfähig</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- brennbare Gase werden nicht beseitigt!</li> <li>- Zeitpunkt des Beginns der Einspeisung, Einspeiserate des Inertgases sind störfallabhängig!</li> <li>- zusätzlicher Druckaufbau im SB durch die nachträgliche Zufuhr von Inertgas</li> <li>- dadurch frühzeitigeres Erreichen der Bedingungen für eine SB-Druckentlastung (Venten),</li> <li>- dadurch höhere Spaltproduktbelastung der Vent-Filter durch eine frühzeitigere Druckentlastung des SB.</li> <li>- Eine intensive Inertgaszufuhr kann Spaltproduktablagerung beeinflussen (Aufwirbeln abgelagerter Aerosole)</li> </ul>

**Tabelle 6.2** Auswahl CO<sub>2</sub> oder N<sub>2</sub>

Vorteile	Nachteile
<b>CO<sub>2</sub></b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>- geringere Mengen erforderlich für eine volle Inertisierung</li> <li>- geringerer Druckaufbau im SB im Vergleich zu N<sub>2</sub></li> <li>- Einengung des Zündbereiches im Dreistoff-Diagramm im Vergleich zum Wasserdampf (Bild 2.3)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Flüssig-Einspeisung von CO<sub>2</sub> erfordert weitverzweigtes Rohrleitungsnetz im SB</li> <li>- vor den CO<sub>2</sub>-Einspeisedüsen muß bei Flüssig-Einspeisung immer ein Vor- druck &gt; 5 bar herrschen (Trockeneis- bildung, Verstopfung)</li> <li>- obige Forderung ist u.U. bei schweren Störfällen nicht zu gewährleisten (Teilerstörung des</li> </ul>
<b>N<sub>2</sub></b>	
	<ul style="list-style-type: none"> <li>- größere Mengen für eine volle Inertisierung erforderlich</li> <li>- deutlich größerer Druckaufbau im SB im Vergleich zu CO<sub>2</sub></li> <li>- Erweiterung des Zündbereiches im Dreistoff-Diagramm im Vergleich zum Wasserdampf (Bild 2.3)</li> <li>- relativ hohe Lagerverluste</li> </ul>

**Tabelle 6.3** Flüssige oder gasförmige Einspeisung in den SB

Vorteile	Nachteile
<b>gasförmige Einspeisung</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>- keine technischen Probleme</li> <li>- geringfügiger Einfluß auf den Normalbetrieb</li> <li>- Benutzung bestehender Systeme zur Einspeisung möglich</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Energiebedarf für Verdampfung und Aufwärmung der Inertgase (unterschiedlich für CO<sub>2</sub> und N<sub>2</sub>, siehe Kap. 3.3)</li> </ul>
<b>flüssige Einspeisung</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Energieverbrauch zur Verdampfung und Aufwärmung, damit Druck- und Temperatur-Reduzierung im SB</li> <li>- bei CO<sub>2</sub> einfache Handmaßnahmen zur Einspeisung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- neue technische Lösungen erforderlich für Durchführung von Flüssiggas-Leitungen (Isolierung) durch den SB</li> <li>- Werkstoffprobleme durch Kälteschock für sicherheitstechnisch relevante Komponenten und Instrumentierungen möglich (auch Einfrieren)</li> </ul>

**Tabelle 6.4** Inertgas-Lagerung innerhalb/außerhalb des SB

Vorteile	Nachteile
<b>Lagerung außerhalb SB</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>- kein technisches Problem bis Standardgrößen (~ 50t).</li> <li>- technische Probleme für die Lagerung von Inertgas in Großbehältern erscheinen lösbar.</li> <li>- CO<sub>2</sub>-Lagerung bietet Vorteile gegenüber N<sub>2</sub>-Lagerung, da Verdampfungsverluste mit relativ kleinen Kühlaggregaten vermieden werden können.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- größere Behälter als Standardgröße erfordern neue technische Konzeption, da zur Zeit noch nicht verfügbar.</li> <li>- Verdampfungsverluste bei N<sub>2</sub> steigen proportional zur Behältergröße.</li> <li>- druckfestes Lagergebäude (Bunker) erforderlich zum Schutz der Umgebung vor einem Behälterzerknall.</li> </ul>
<b>Lagerung innerhalb SB</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>- keine kälteisolierten Durchführungen durch den Sicherheitsbehälter erforderlich.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- bei Groß- oder Standardbehältern innerhalb SB geschützte Lagerbereiche erforderlich.</li> <li>- bei bestehenden Anlagen Probleme bei nachträglichem Einbau.</li> <li>- bei Flaschen-Lagerung hohe Anzahl (&gt; 20 000 bei N<sub>2</sub>), aufwendiges Verteilungssystem, erheblicher Platzbedarf.</li> <li>- keine Zugänglichkeit beim Störfall.</li> <li>- Einschränkungen für den Normalbetrieb durch Lagerung von Hochdruck-Gasflaschen (Schutzbunker).</li> </ul>

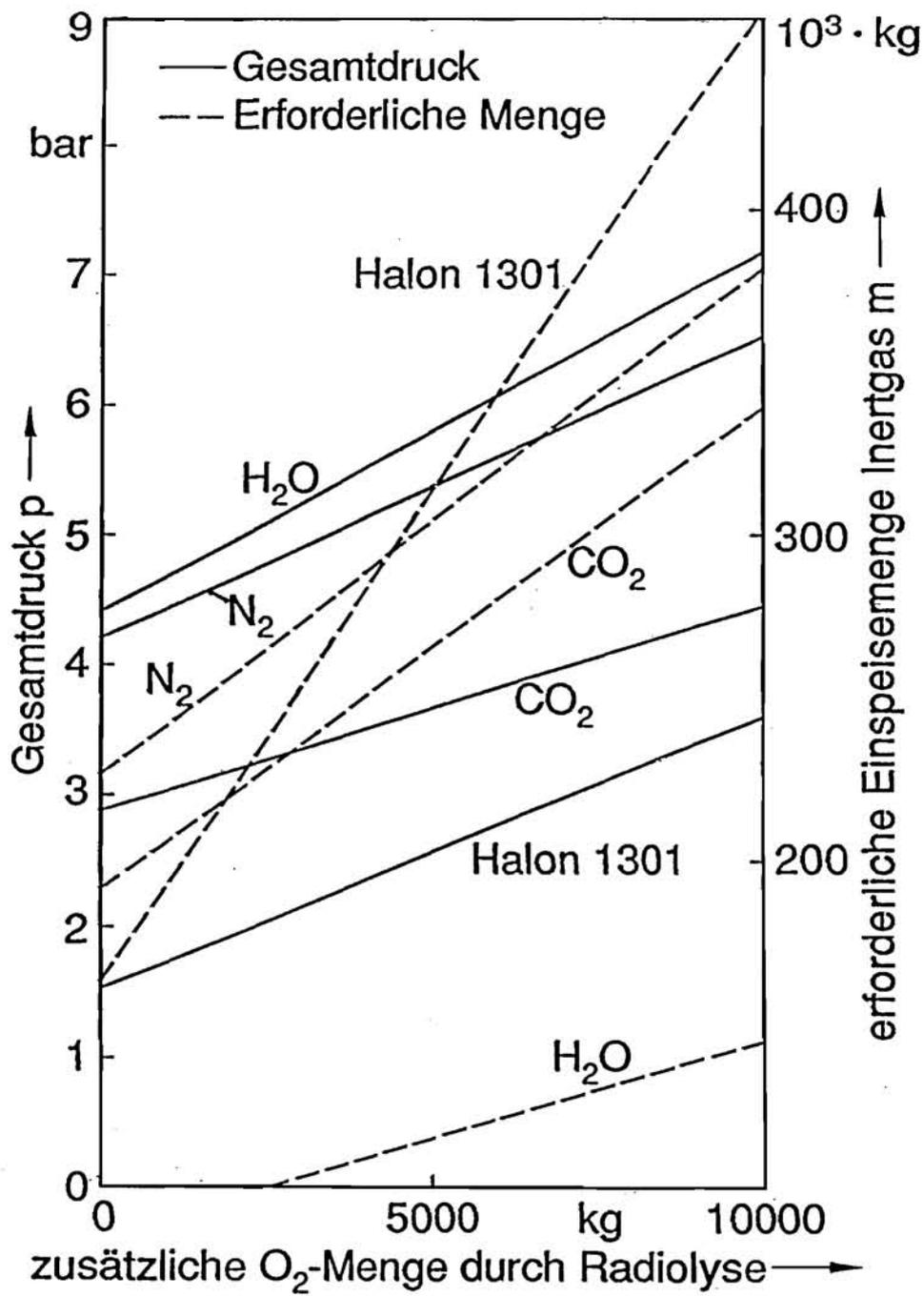
**Tabelle 6.5** Schalthandlungen

Vorteile	Nachteile
<b>Einspeisung durch Handmaßnahmen</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Entscheidung bezüglich Einspeisezeitpunkt und -menge kann störfall-abhängig getroffen werden.</li> <li>- Fehlleistungen (Komponenten, Schalthandlung) werden unmittelbar bemerkt.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Entscheidung zum frühesten Einspeisezeitpunkt muß unter Streß innerhalb der ersten Stunde abzüglich der Vorbereitungszeit mit zahlreichen Schalthandlungen getroffen werden, obwohl u. U. noch keine eindeutigen Einspeisekriterien vorliegen.</li> <li>- Unnötige Einspeisung möglich.</li> </ul>
<b>vollautomatische Einspeisung</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>- keine Fehlentscheidung oder Fehlhandlung aufgrund Streßsituation oder unklarer Entscheidungskriterien möglich</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- bei beherrschtem, die Auslegung nicht überschreitendem Ereignis unnötige Inertisierung mit entsprechenden negativen Folgen (Druck hoch, Leckagen, Temperatur- und Korrosionsprobleme)</li> <li>- Ausfall des gesamten Systems möglich</li> </ul>
<b>automatische Einspeisevorbereitung</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Einspeisevorbereitung kann sofort erfolgen, Entscheidung zum Einspeisen erfolgt störfallabhängig, als Handmaßnahme möglich</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ausfälle werden nicht oder spät bemerkt</li> </ul>

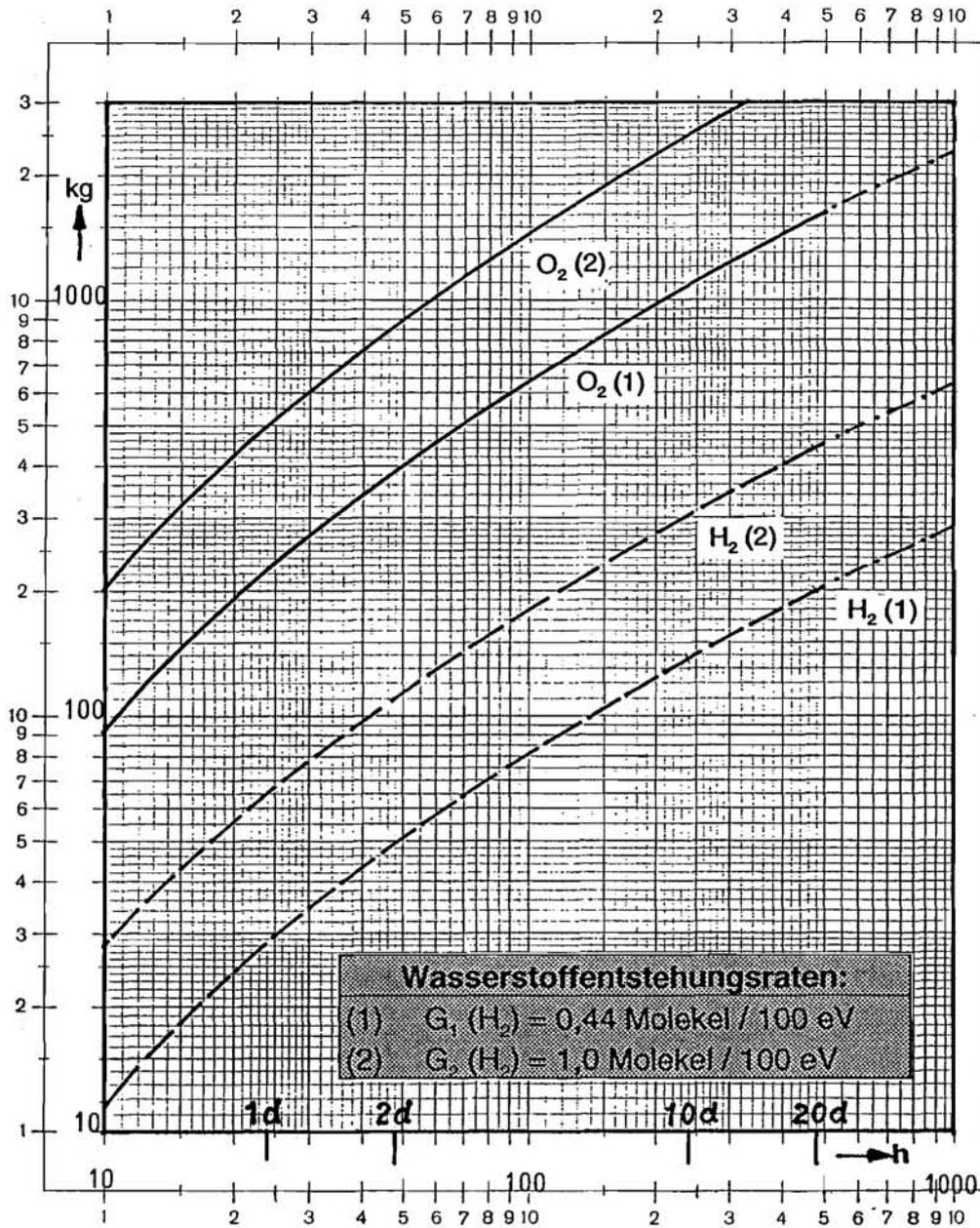
**Tabelle 6.6** Einspeiseort

Vorteile	Nachteile
<b>Einspeisung in die Anlagenräume</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Einspeisung nahe der H<sub>2</sub>-Freisetzung, dort unmittelbare Inertisierung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- stabile Gasschichtung zwischen Anlagen- und Betriebsräumen kann Inertisierung der oberen Betriebsräume beeinträchtigen</li> <li>- aktive Vermischungseinrichtungen (Energiebedarf) erforderlich</li> </ul>
<b>Einspeisung in die oberen Betriebsräume</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>- durch kalte Inertgase angeregte Konvektion führt zu guter Vermischung</li> <li>- Gefährdung von sicherheitsrelevanten Komponenten durch Kaltgaseinspeisung gering</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Öffnungsquerschnitte zwischen Anlagen- und Betriebsräumen müssen aktiv geöffnet werden können</li> </ul>

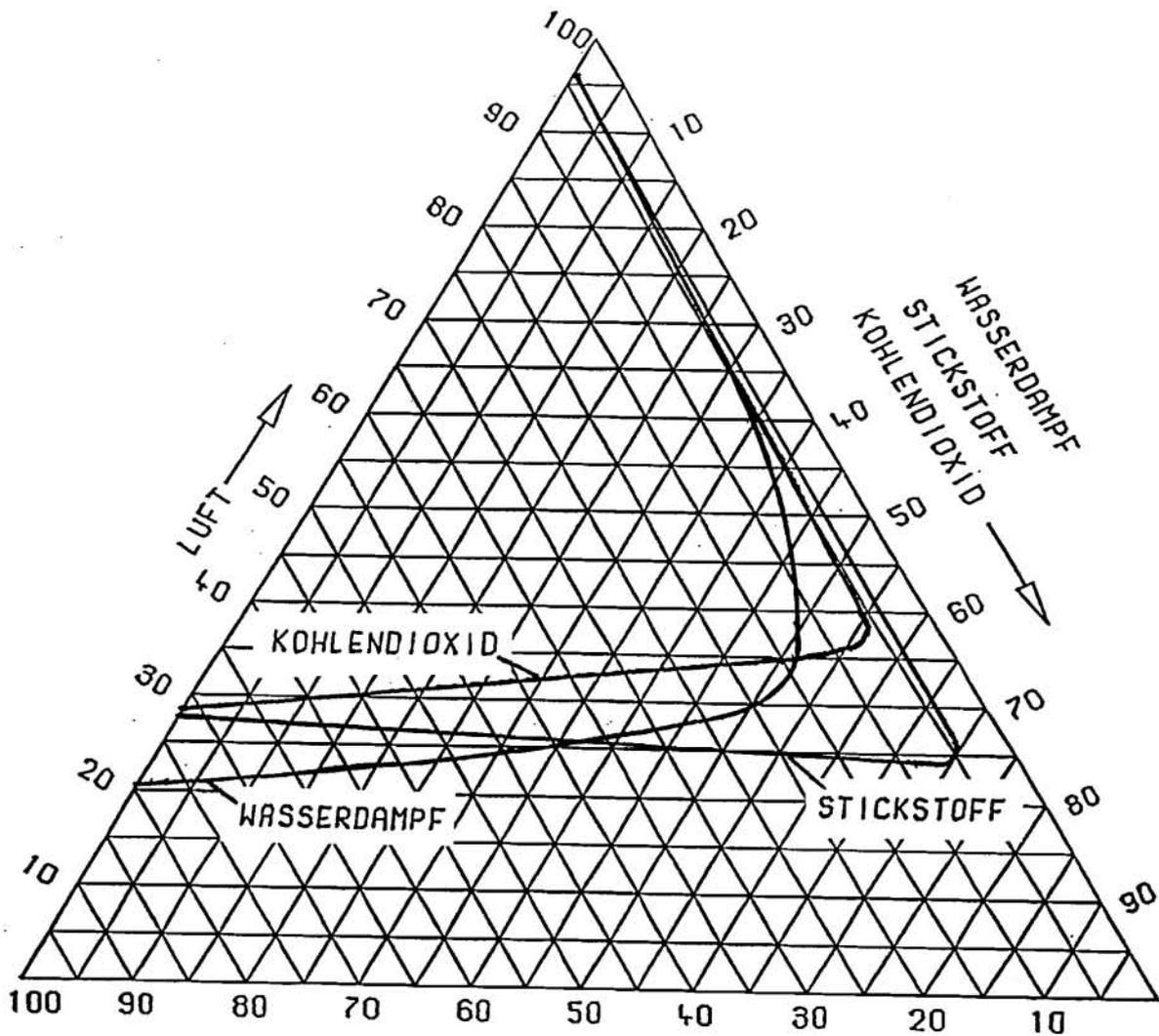
## 10 Bilder



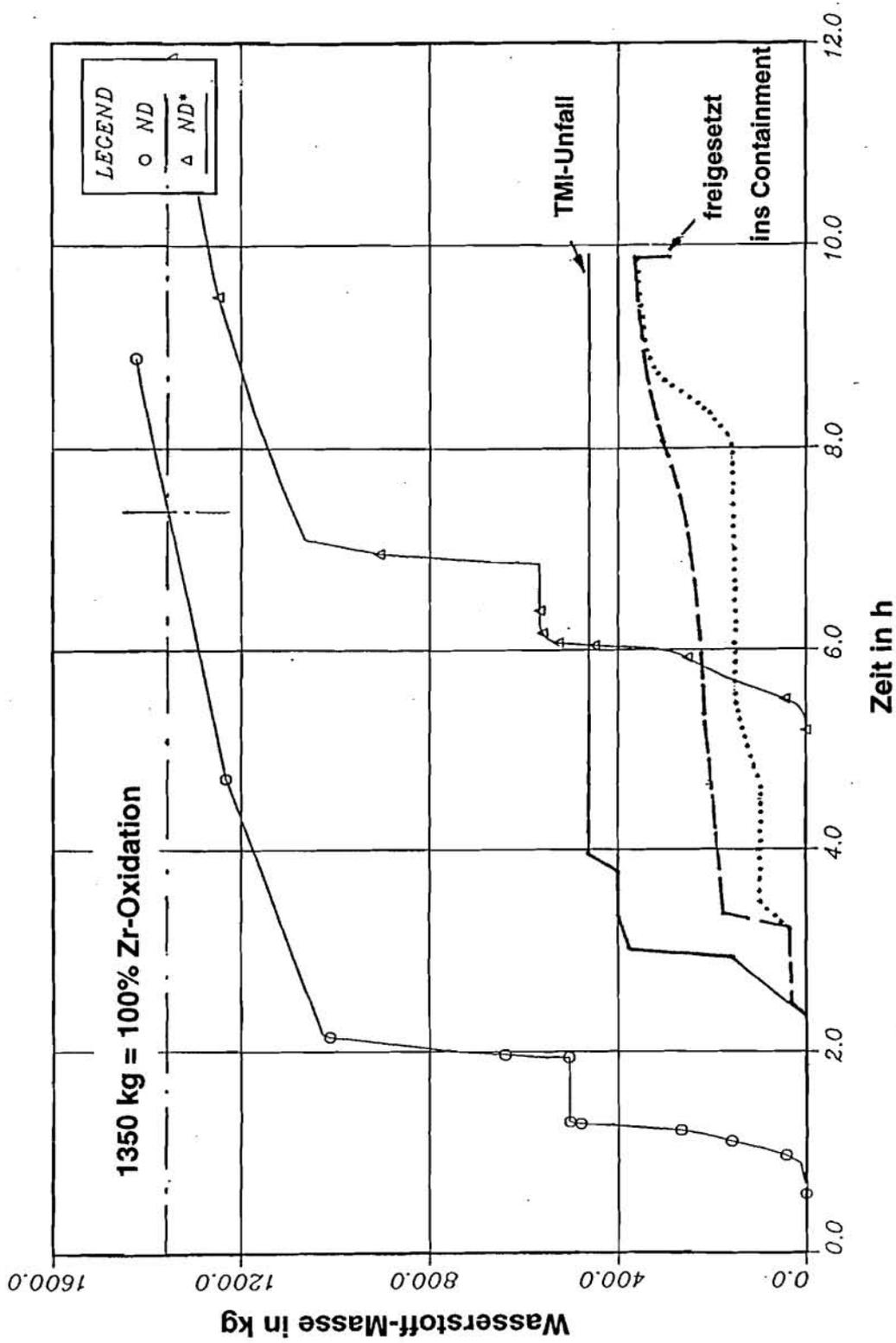
**Bild 2.1** Langzeitige Inertgas-Einspeisung in einen 70000 cbm Sicherheitsbehälter (Zustand: kalt)



**Bild 2.2** Langzeitige Entstehung von Gasen durch Sumpfwasser-Radiolyse nach einem Kernschmelzunfall



**Bild 2.3** Zündbarkeitsgrenzen für ein Gasgemisch aus Wasserstoff, Luft und einem Inertgas



**Bild 4.1** Aufsummierte Wasserstoff-Masse für verschiedene Unfallabläufe

DRS B: ND\*-Pfad CONDRO  
Ohne Sumpfkontakt

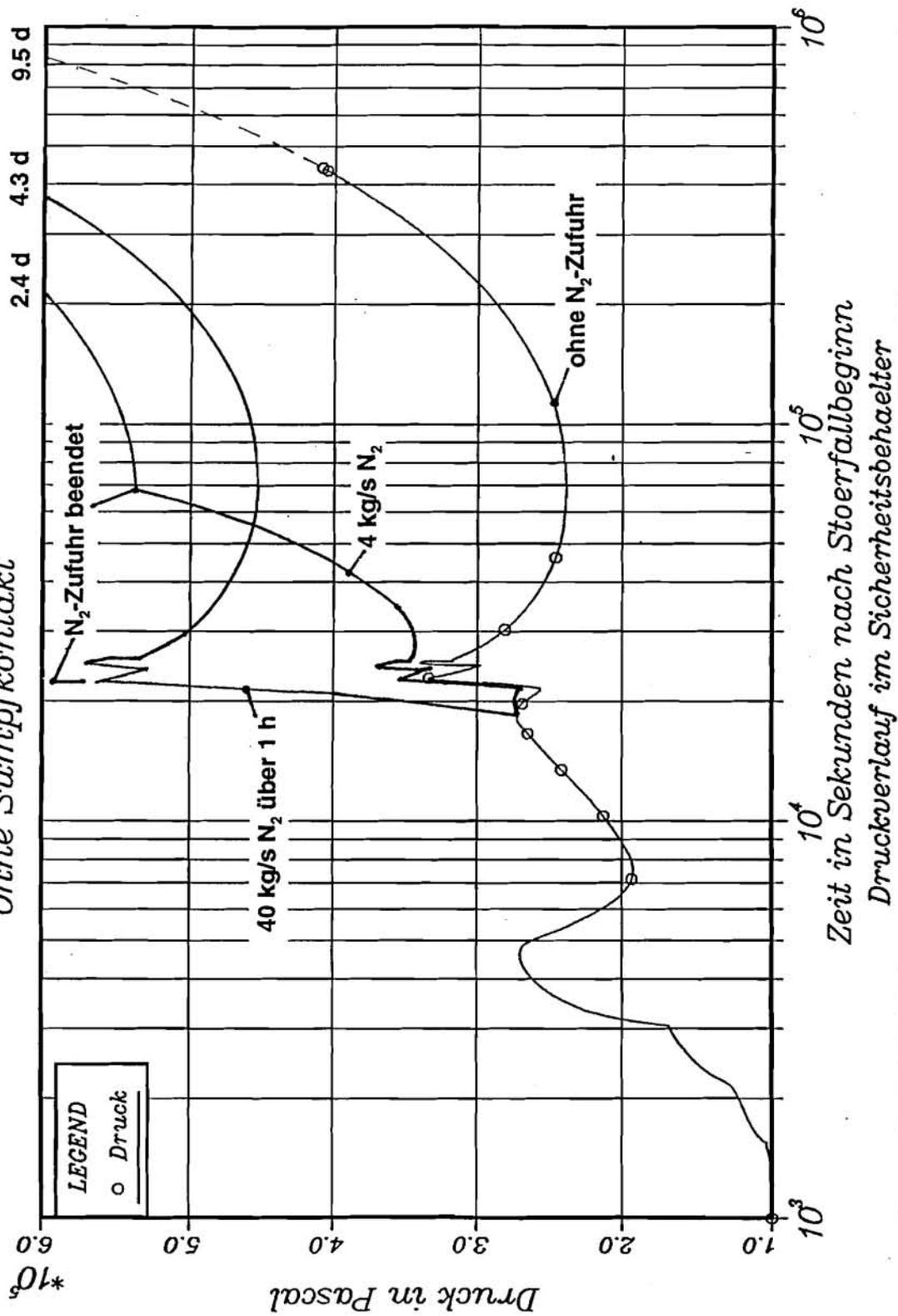
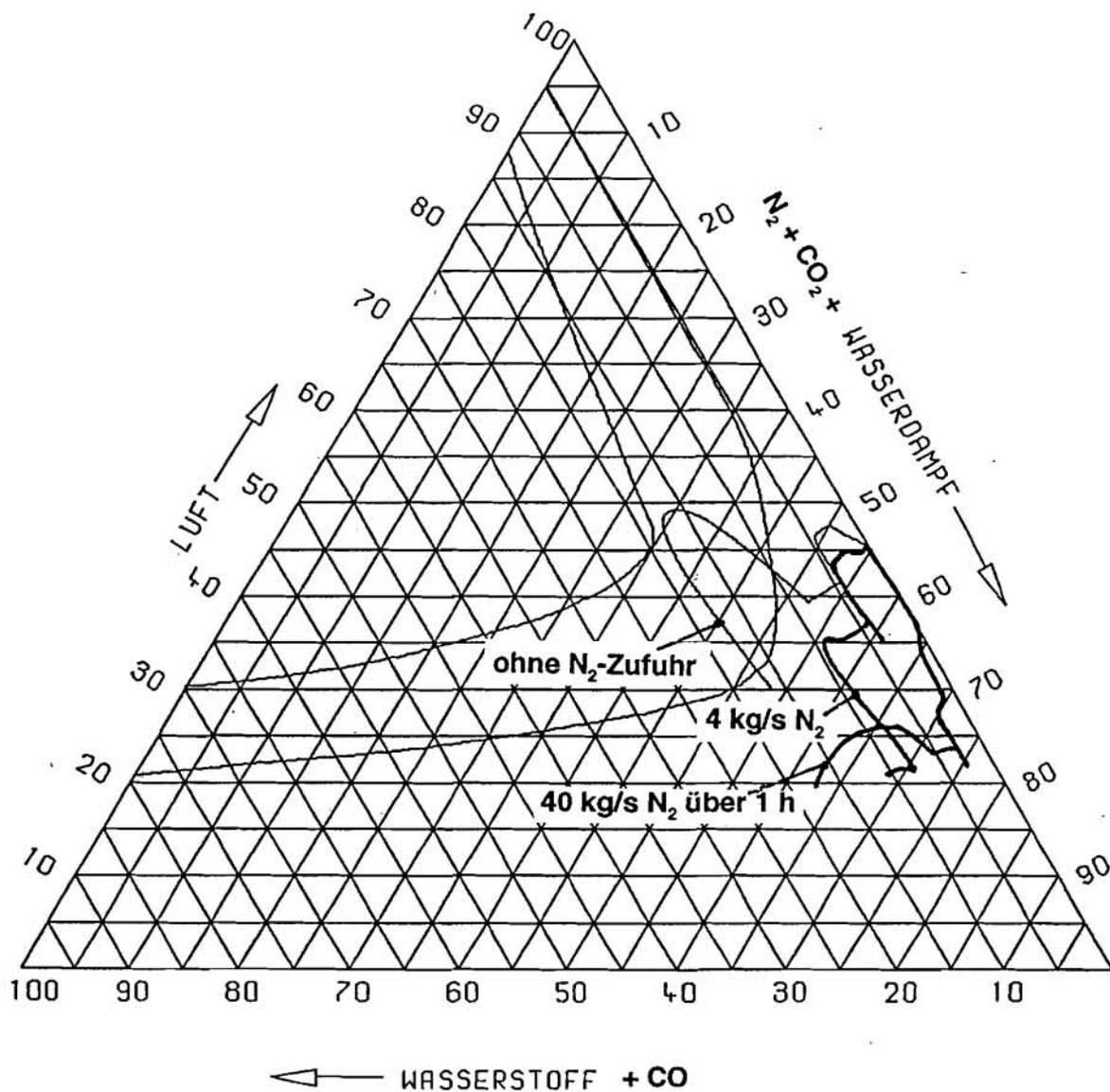


Bild 4.2 Druckverläufe im Sicherheitsbehälter bei Stickstoffzufuhr

ZUENDGRENZEN FUER  
WASSERSTOFF-LUFT-DAMPF - GEMISCHE



**Bild 4.3** H<sub>2</sub>-Konzentration im Sicherheitsbehälter bei N<sub>2</sub>-Zufuhr  
ND\*Pfad ohne Sumpfkontakt

# DRS B: ND\*-Pfad CONDRU

Ohne Sumpfkontakt

5.1 d 6.8 d 10.3 d

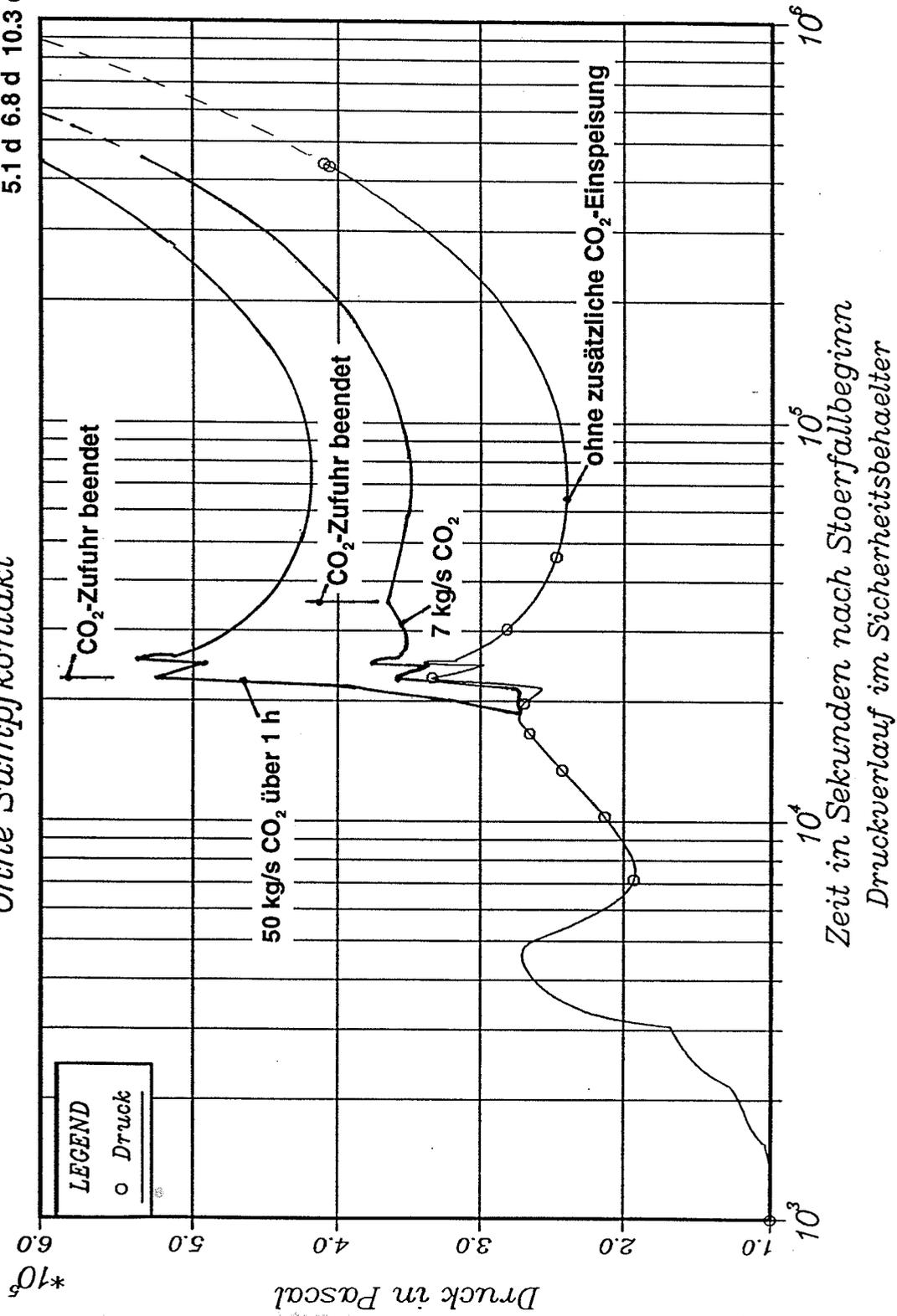


Bild 4.4 Druckverläufe im Sicherheitsbehälter bei CO<sub>2</sub>-Zufuhr

ZUENDGRENZEN FUER  
WASSERSTOFF-LUFT-DAMPF - GEMISCHTE

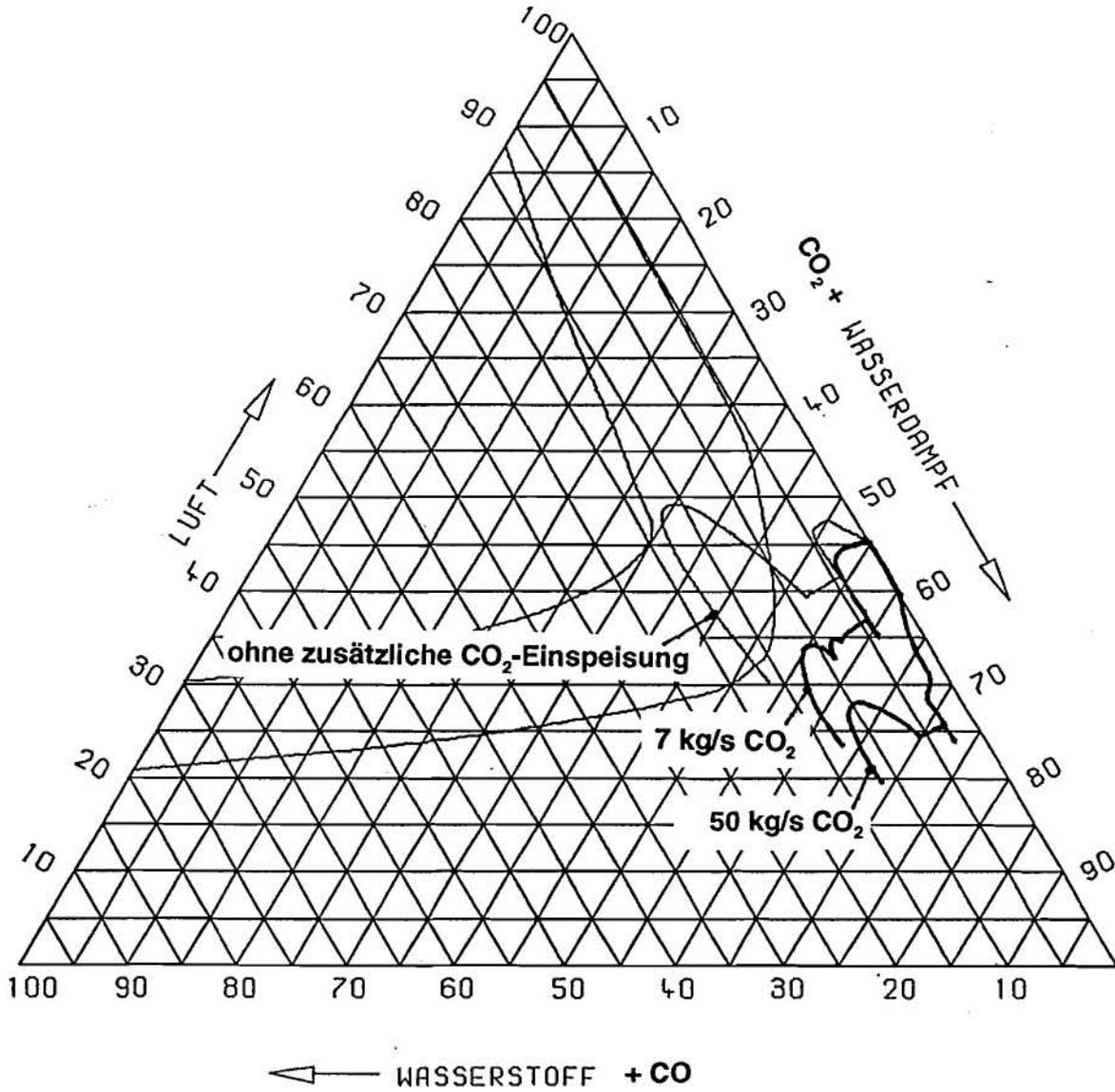


Bild 4.5 H<sub>2</sub>-Konzentration im Sicherheitsbehälter bei CO<sub>2</sub>-Zufuhr

DRS B: ND-Pfad CONDRO  
Ohne Sumpfkontakt

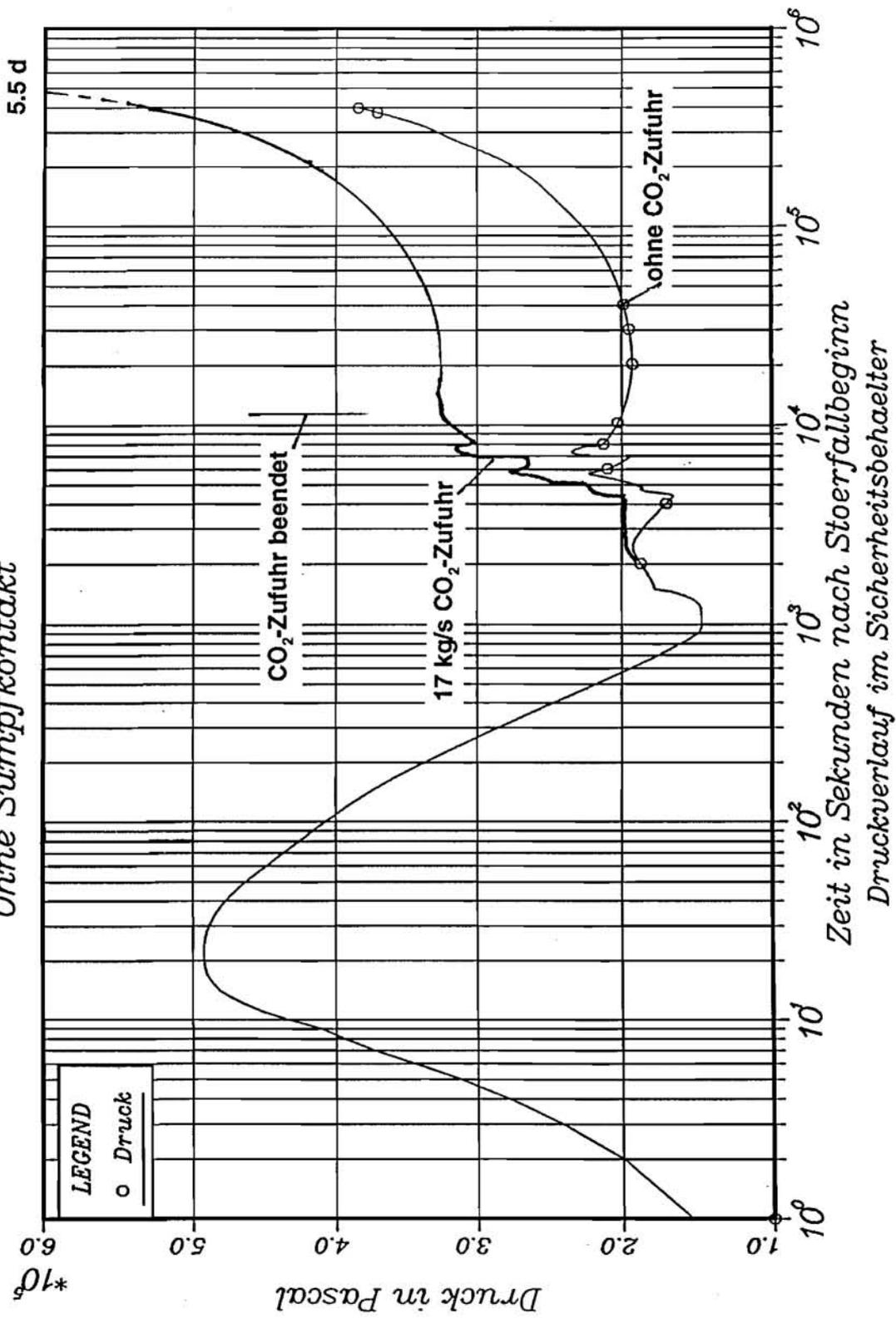
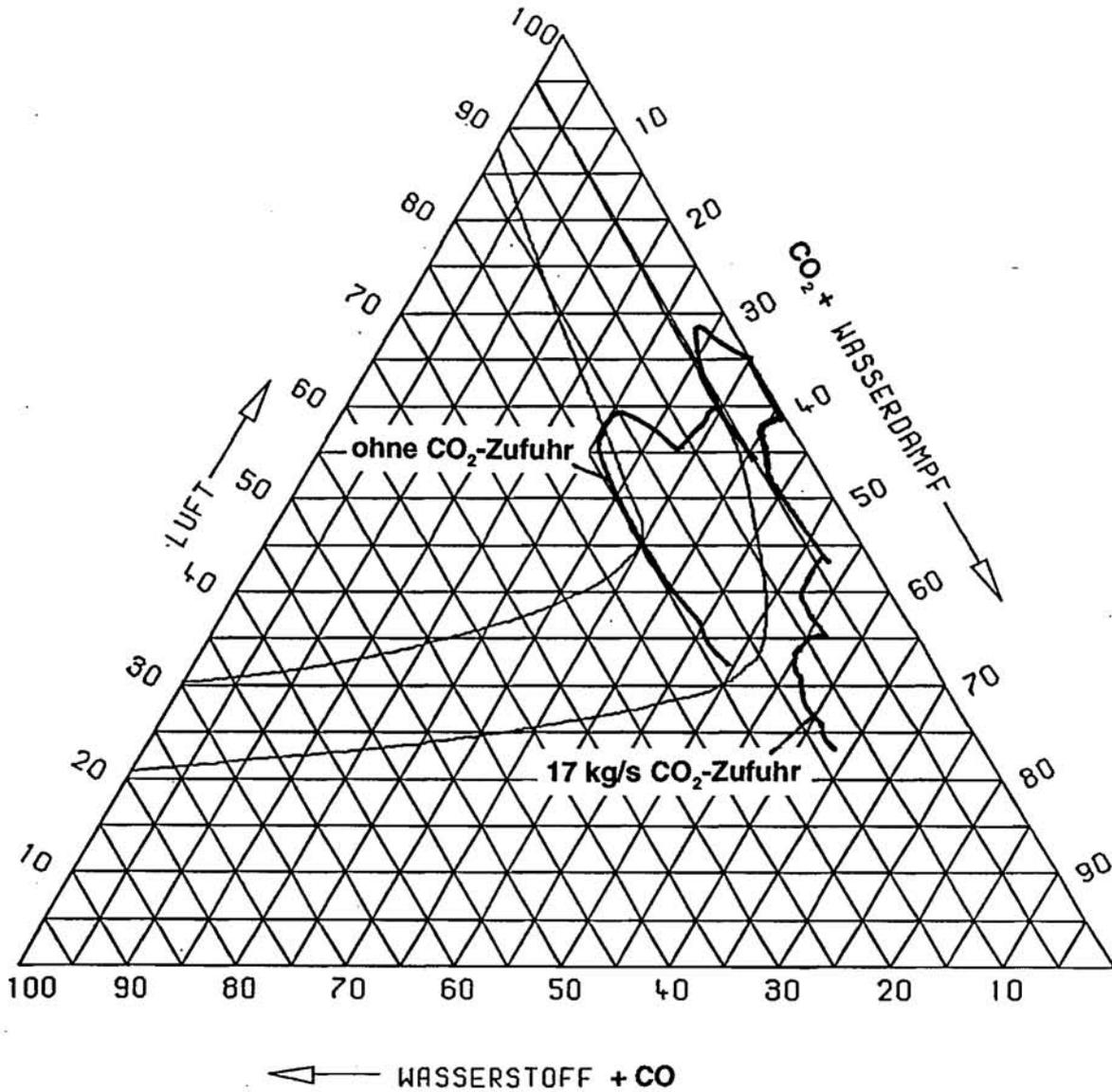


Bild 4.6 Druckverlauf im Sicherheitsbehälter bei CO<sub>2</sub>-Zufuhr

ZUENDGRENZEN FUER  
WASSERSTOFF-LUFT-DAMPF - GEMISCHTE



**Bild 4.7** H<sub>2</sub>-Konzentration im Sicherheitsbehälter bei CO<sub>2</sub>-Zufuhr  
ND-Pfad ohne Sumpfkontakt

DRS H2-VERT .ND\* RAL286 2BZ.92V.70 HSL.TZ

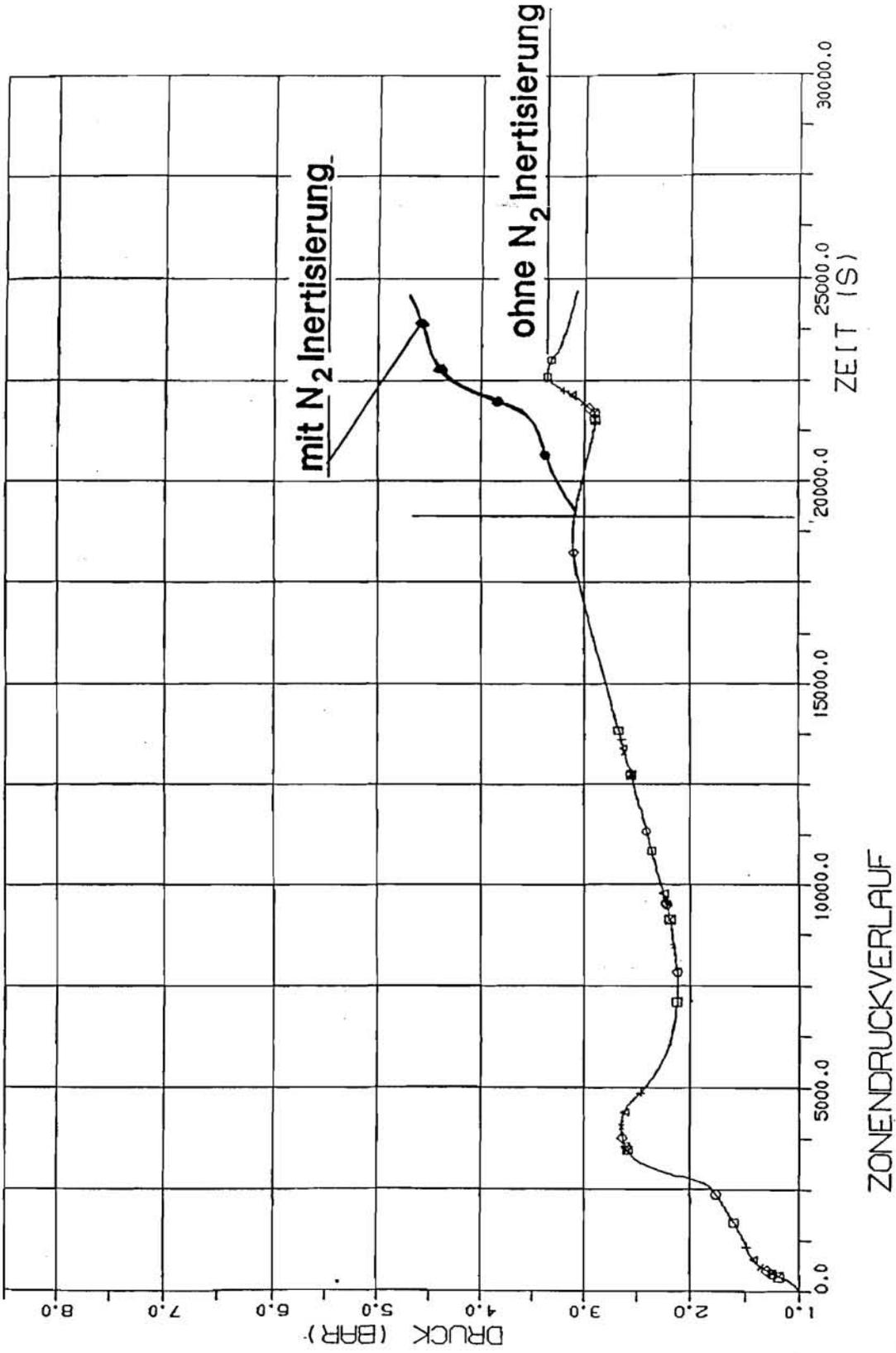


Bild 4.8 Zonendruckverlauf mit und ohne N<sub>2</sub>-Inertisierung beim ND\*-Pfad

DRS H2-VERT.ND\* RAL286 28Z.92V.70 HSL.TZ.N2EIN

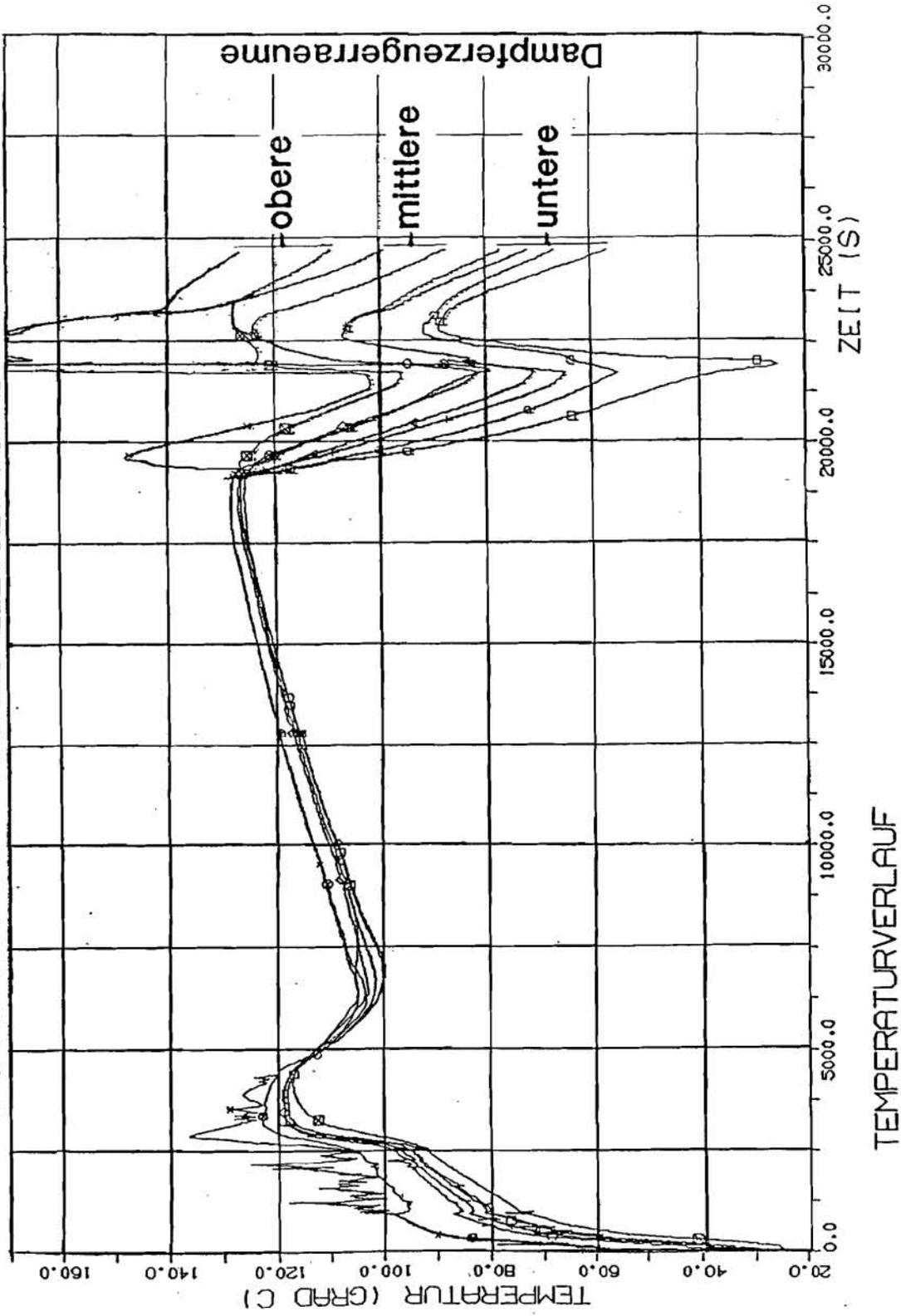


Bild 4.9 Temperaturverläufe in den Dampferzeuger-Räumen bei N<sub>2</sub>-Inertisierung

DRS H2-VERT.ND\* RAL286 28Z.92V.70 HSL.TZ.N2EIN

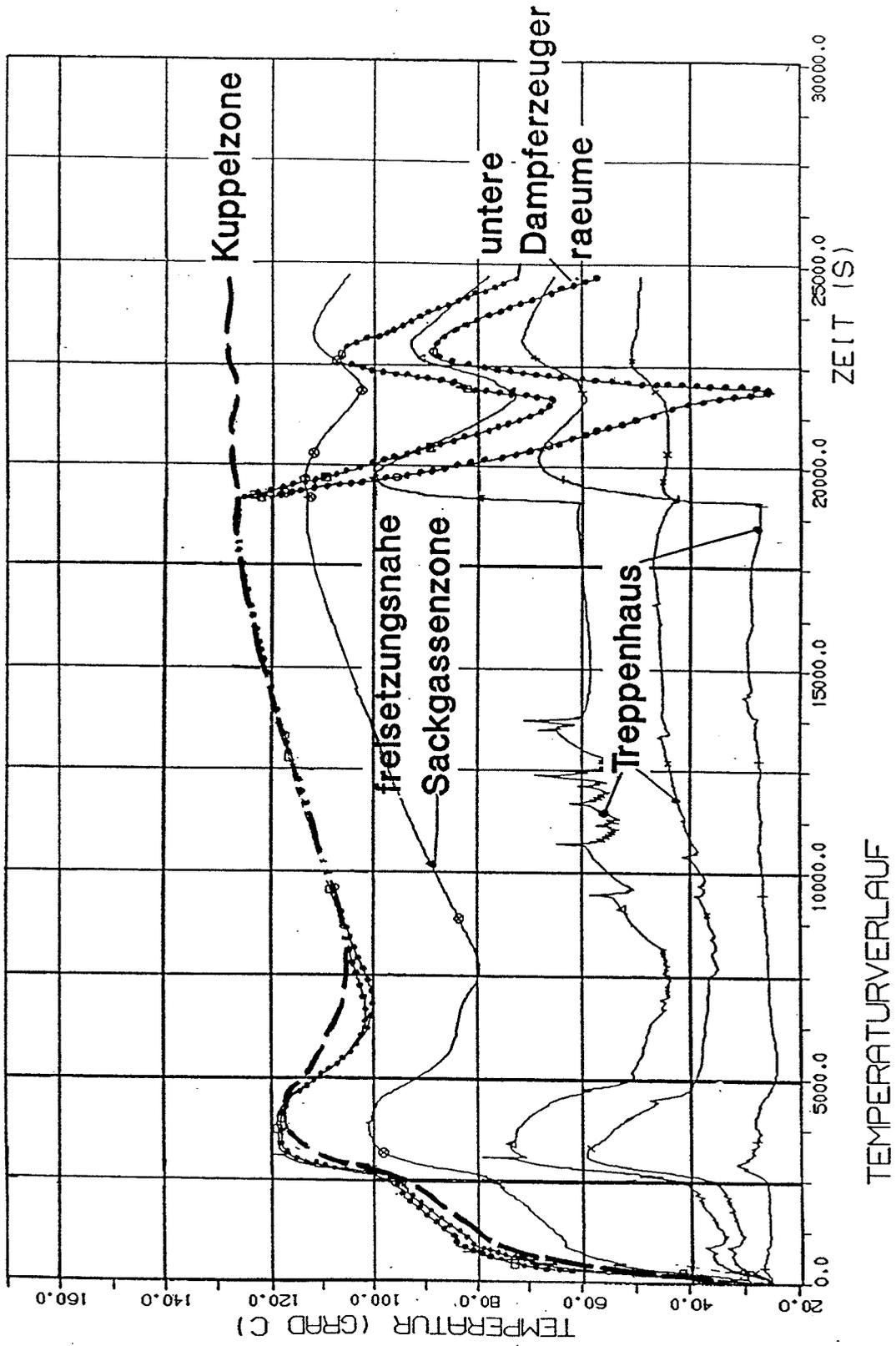
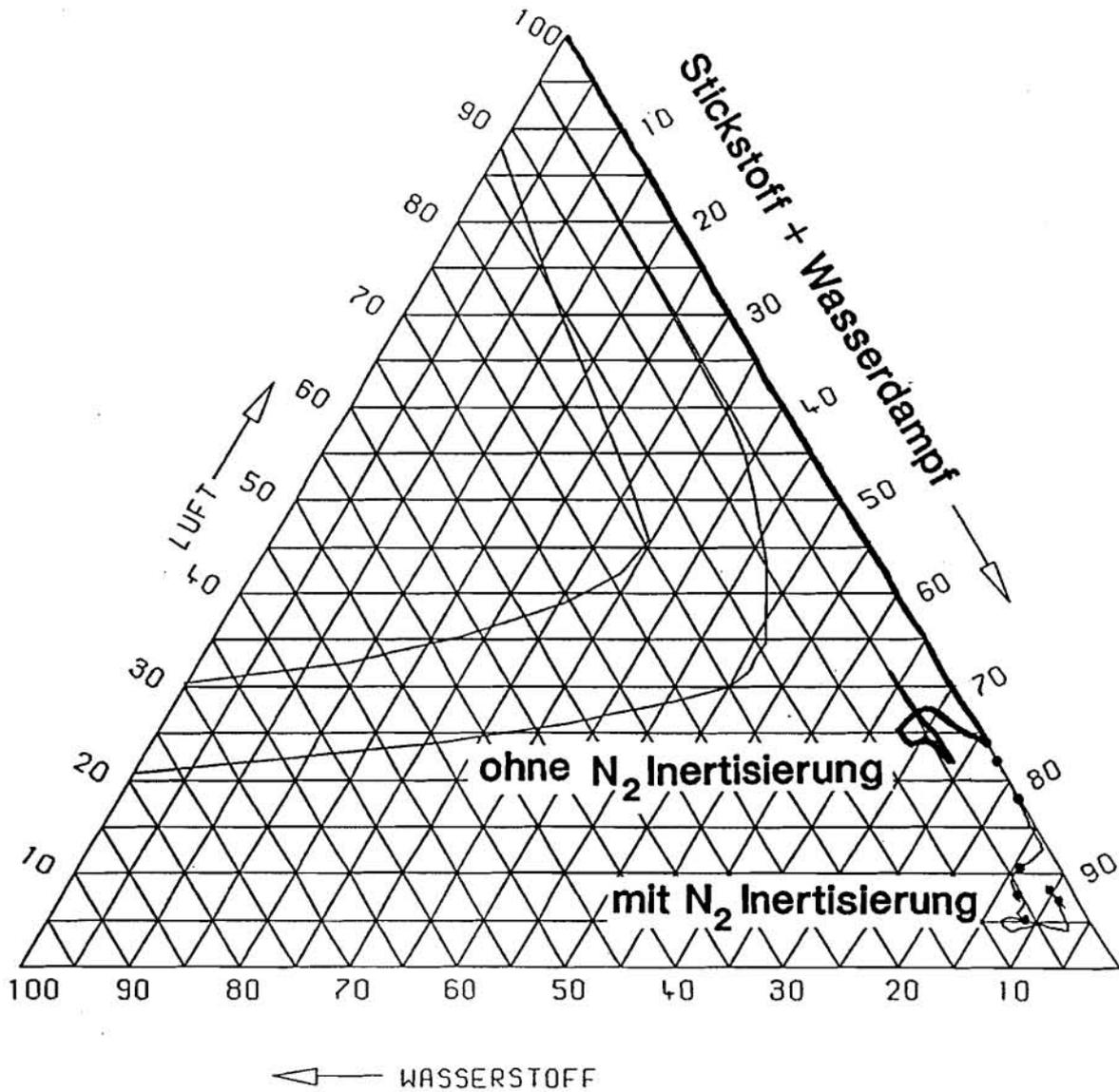


Bild 4.10 Temperaturverläufe in verschiedenen Zonen bei N<sub>2</sub>-Inertisierung

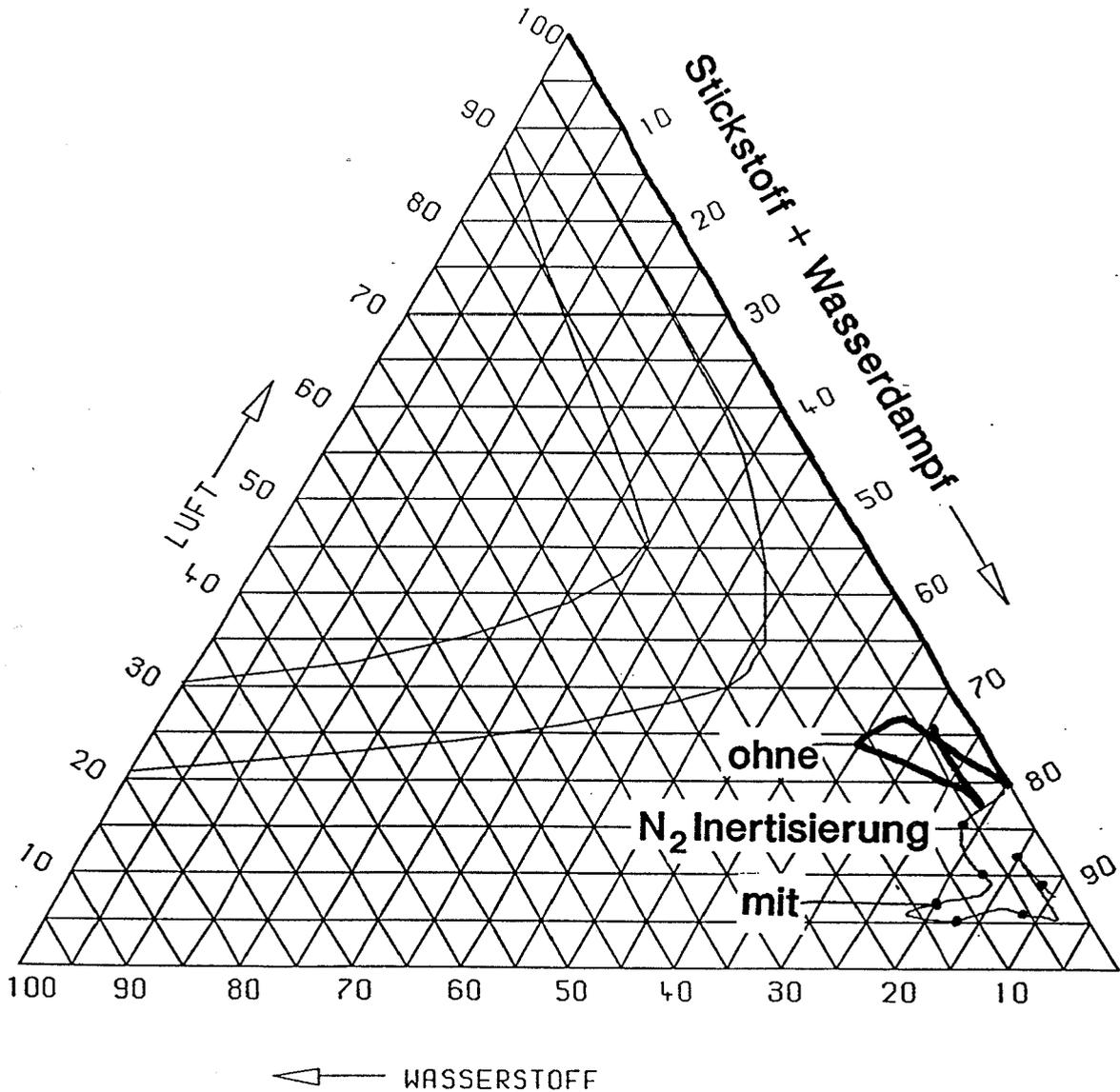
ZUENDGRENZEN FUER  
WASSERSTOFF-LUFT-DAMPF - GEMISCHE



H<sub>2</sub> KONZENTRATION unterer Dampferzeugerraum  
 ND\* TZ., N<sub>2</sub> AB 19200.S,  
 RALOC-S, 28 ZONENMODELL, N<sub>2</sub>+DAMPF

**Bild 4.11** H<sub>2</sub>-Konzentrationsverlauf im unteren DE-Raum mit und ohne N<sub>2</sub>-Inertisierung

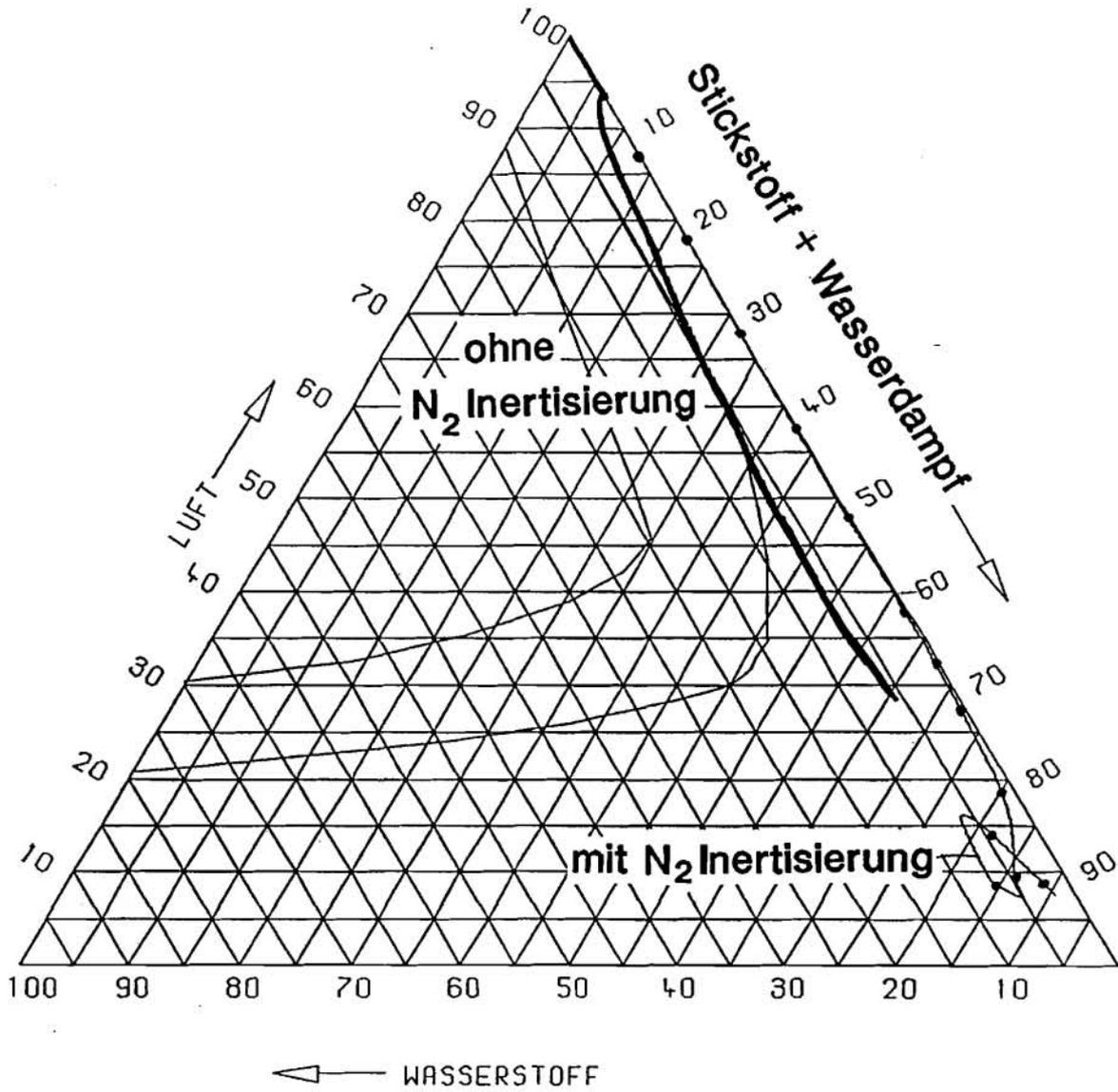
ZUENDGRENZEN FUER  
WASSERSTOFF-LUFT-DAMPF - GEMISCHTE



H<sub>2</sub> KONZENTRATION **mittlerer Dampferzeugerraum**  
 ND\* TZ., N<sub>2</sub> AB 19200.S,  
 RALOC-S, 28 ZONENMODELL, N<sub>2</sub>+DAMPF

**Bild 4.12** H<sub>2</sub>-Konzentrationsverlauf im mittleren DE-Raum mit und ohne  
N<sub>2</sub>-Inertisierung

ZUENDGRENZEN FUER  
WASSERSTOFF-LUFT-DAMPF - GEMISCHTE



H<sub>2</sub> KONZENTRATION

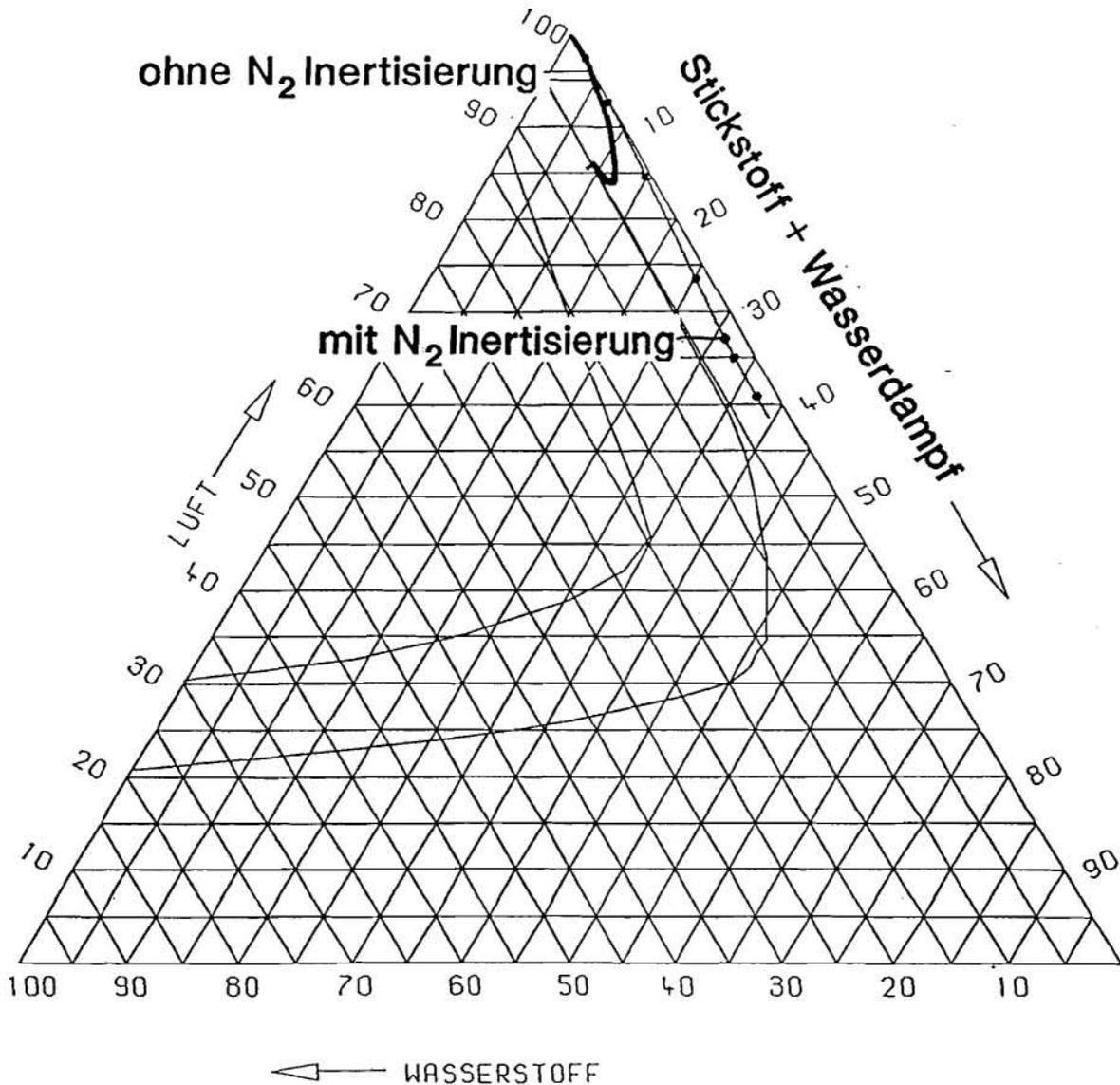
Treppenhaus

ND\* TZ., N<sub>2</sub> AB 19200.S.

RAL OC-S, 28 ZONENMODELL, N<sub>2</sub>+DAMPF

Bild 4.13 H<sub>2</sub>-Konzentrationsverlauf im Treppenhaus 1 mit und ohne N<sub>2</sub>-Inertisierung

ZUENDGRENZEN FUER  
WASSERSTOFF-LUFT-DAMPF - GEMISCHE



H<sub>2</sub> KONZENTRATION

**Treppenhaus**

ND\* TZ., N<sub>2</sub> AB 19200.S,

RALOC-S, 28 ZONENMODELL, N<sub>2</sub>+DAMPF

**Bild 4.14** H<sub>2</sub>-Konzentrationsverlauf im Treppenhaus 2 mit und ohne N<sub>2</sub>-Inertisierung

**Gesellschaft für Anlagen-  
und Reaktorsicherheit  
(GRS) mbH**

Schwertnergasse 1  
**50667 Köln**

Telefon (02 21) 20 68-0  
Telefax (02 21) 20 68 442  
Telex 2 214 123 grs d

Forschungsgelände  
**85748 Garching b. München**

Telefon (0 89) 3 20 04-0  
Telefax (0 89) 3 20 04 299  
Telex 5 215 110 grs md

Kurfürstendamm 200  
**10719 Berlin**

Telefon (0 30) 88 41 89-0  
Telefax (0 30) 88 23 655