



---

Gesellschaft für  
Reaktorsicherheit (GRS) mbH

---

GRS-Bericht

Theoretische Bestimmung von  
Edelgasnuklidspektren in der  
Abluft von Kernkraftwerken mit  
Druckwasserreaktor

D. Holm

---

GRS-8 (Januar 1978)



---

Gesellschaft für Reaktorsicherheit (GRS) mbH

## **GRS-Bericht**

# **Theoretische Bestimmung von Edelgasnuklidspektren in der Abluft von Kernkraftwerken mit Druckwasserreaktor**

Detlef Holm

**GRS-8 (Januar 1978)**

### Kurzfassung

Dieser Bericht zeigt einen möglichen Weg auf, wie die Zusammensetzung der Edelgasaktivität in der Abluft von Kernkraftwerken mit Druckwasserreaktor theoretisch ermittelt werden kann. Die Grundlagen zur Ermittlung der Edelgasnuklidspektren bilden die in der Praxis gewonnenen Meßdaten über die Aktivitätsquellstärke im Reaktorkern und die anlagenspezifischen Gegebenheiten des betrachteten Kernkraftwerks. Es wird untersucht, wie sich das Edelgasnuklidspektrum bei der Variation der Ableitungskombinationen ändert. Das vorgeschlagene Rechenmodell wird an Hand realer Meßwerte auf seine Tauglichkeit hin überprüft. Für die zur Zeit übliche Bauweise von Druckwasserreaktoren der Kraftwerk Union AG (KWU) wird für eine jährliche Edelgasaktivitätsabgabe von 40 000 Ci ein als hinreichend konservativ anzusehendes Nuklidspektrum vorgestellt.

### Abstract

This report shows a possible means of calculating theoretically the composition of noble gas activity in gaseous effluents of nuclear power plants with pressurized water reactors. The calculations of the noble gas nuclide spectra are based on generated data of the activity source terms in the reactor core and plant-specific design features. How the noble gas nuclide spectrum varies by altering the discharge pathway combination is examined. The proposed mathematical model was verified via real measurement data. For a noble gas activity discharge of 40 000 Ci per year from pressurized water reactors built at this time from Kraftwerk Union AG (KWU) a sufficient conservative nuclide spectrum is given.

INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
1. Einleitung . . . . .	1
2. Grundlagen für die Bestimmung von Edelgas- nuklidspektren . . . . .	1
2.1 Edelgasaktivität im Primärkühlmittel . . . . .	1
2.2 Ableitungspfade . . . . .	3
2.2.1 Abgasanlage . . . . .	3
2.2.2 Dampferzeugerleckage . . . . .	5
2.2.3 Primärkreisleckage innerhalb des Reaktorgebäu- des . . . . .	6
2.2.4 Leckagen innerhalb des Reaktorgebäude-Ringraums	7
2.2.5 Leckagen innerhalb des Reaktorhilfsanlagege- bäudes . . . . .	7
3. Mögliche Edelgasspektren in der Abluft eines Kernkraftwerkes mit Druckwasserreaktor, Typ Biblis C . . . . .	8
3.1 Diskussion der verwendeten Daten . . . . .	8
3.2 Diskussion der Ergebnisse . . . . .	9
3.3 Vergleich mit bisher gemessenen Edelgasnuklid- spektren . . . . .	9
3.4 Nachvollziehung des von der Strahlenschutzkom- mission vorgeschlagenen Edelgasnuklidspektrums mit Hilfe des Rechenmodells . . . . .	10
4. Zusammenfassung . . . . .	10
5. Tabellen . . . . .	12
6. Literaturverzeichnis . . . . .	17
7. Verteiler . . . . .	18

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

	Seite
Bild 1: Rückhaltung radioaktiver Stoffe an Kernkraftwerken mit Druckwasserreaktor, Typ "Biblis C" . . . . .	4

TABELLENVERZEICHNIS

Tab. 1: Daten der Referenzanlage . . . . .	12
Tab. 2: Ableitungskombinationen und Leckagemengen	13
Tab. 3: Dosisumrechnungsfaktoren für $\beta$ - und $\gamma$ -Submersion nach /5/ . . . . .	14
Tab. 4: Nuklidspektren, zugehörige mittlere Dosisumrechnungsfaktoren und Aktivitätsabgaben	15

## 1. EINLEITUNG

Die äußere Strahlenbelastung des Menschen in der frei zugänglichen Umgebung eines Kernkraftwerks, bedingt durch die Ableitung radioaktiver Edelgase mit der Fortluft, hängt neben der Höhe der Aktivitätsabgabe entscheidend ab von der Nuklidzusammensetzung. Für die Berechnung der über diesen Belastungspfad möglicherweise verursachten  $\beta$ - und  $\gamma$ -Submersionsdosis ist es daher notwendig, auch die Nuklidzusammensetzung der abgeleiteten Edelgasaktivität zu kennen.

Die bisher bekannten Nuklidspektren der aus deutschen Kernkraftwerken mit Druckwasserreaktor abgeleiteten Edelgasaktivität sind bei jährlichen Edelgasaktivitätsabgaben zwischen 1000 und 4000 Ci ermittelt worden. Die beantragten Werte der jährlichen Edelgasaktivitätsabgabe liegen demgegenüber zwischen 60 000 und 90 000 Ci. Für derart hohe jährliche Edelgasaktivitätsabgaben liegen keine Erfahrungswerte über die Nuklidzusammensetzung vor. Die Verwendung der bei niedrigen Aktivitätsabgaben ermittelten Edelgasnuklidspektren für die Dosisberechnung bei hohen Edelgasaktivitätsabgaben erscheint nicht sinnvoll, weil dabei der Anlagenaufbau und die Maßnahmen zur Reduzierung der Aktivitätsableitung nicht berücksichtigt werden. Zur Ermittlung der bei Ausschöpfung der Antragswerte möglicherweise auftretenden Strahlenbelastung in der frei zugänglichen Umgebung eines Kernkraftwerks ist es daher notwendig, das Nuklidspektrum für den beantragten Wert der jährlichen Edelgasaktivitätsabgabe unter Berücksichtigung des Anlagenaufbaus und der vorhandenen Rückhaltesysteme zu ermitteln.

Die vorliegende Arbeit zeigt einen möglichen Weg auf, wie bei der Ermittlung eines Edelgasspektrums vorgegangen werden kann; er entspricht der in /1/ beschriebenen Vorgehensweise. Gleichzeitig wird ein mit Hilfe des beschriebenen Rechenmodells ermitteltes, als hinreichend konservativ zu betrachtendes Edelgasspektrum für ein Kernkraftwerk mit Druckwasserreaktor vom Typ Biblis C bei einer jährlichen Edelgasaktivitätsabgabe von 40 000 Ci vorgestellt.

## 2. GRUNDLAGEN FÜR DIE BESTIMMUNG VON EDELGASNUKLIDSPEKTREN

### 2.1 Edelgasaktivität im Primärkühlmittel

Die Quellstärke der Spalteredelgase aus den Brennelementen hängt ab von der im Brennstoff produzierten Spalteredelgas-Aktivität, den Zerfallskonstanten der jeweiligen Nuklide und den Diffusionsvorgängen im Brennstoff. Die Schwierigkeit der Berechnung der Aktivitätsfreisetzung aus dem Core besteht darin, daß die Diffusionsvorgänge im Brennstoff nicht ausreichend bekannt sind. Es mußte daher ein Weg gefunden werden, aus den in Betrieb befindlichen Kernkraftwerken gemessenen Aktivitätskonzentrationen im Primärkreislauf Rückschlüsse auf die Aktivitätsquellstärke im Core zu ziehen.

Am Kernkraftwerk Gundremmingen durchgeführte Messungen ergeben bei Vorhandensein von Brennelementschäden folgendes Bild: Der Logarithmus des Quotienten aus Quellstärke und Bildungsrate ist eine lineare Funktion des Logarithmus der Zerfallskonstante, wobei für Edelgasnuklide die Steigung der Geraden  $\tan \alpha = -0,5$  beträgt /2/. Aus dieser Beziehung läßt sich zwar die relative Quellstärke der Edelgasnuklide bestimmen, aber nicht die absolute Größe. Für die Auslegung der KWU-Reaktoren wird eine Xe-133-Quellstärke von  $5 \mu\text{Ci s}^{-1} \text{ MW}_{\text{th}}^{-1}$  angenommen /2/. Mit Hilfe dieser Basisgröße lassen sich die Quellstärken für die übrigen Edelgasisotope nach der oben angegebenen Beziehung ermitteln. Die Nachvollziehung dieser Rechnung führt zu den in den Sicherheitsberichten wiedergegebenen Quellstärken aus dem Kern.

Die Aktivitätskonzentration im Primärwasser wird bestimmt durch die Quellstärke der einzelnen Spaltprodukte aus den Brennelementen, die Reinigungsrate des Primärwassers und die Größe der Primärkühlmittelleckage. Werden Reinigungsrate und Leckrate bei gleichbleibender Quellstärke verringert, so wird die Konzentration eines radioaktiven Nuklids um so größer, je kleiner seine Zerfallskonstante ist, d.h., das Nuklidspektrum im Primärwasser verschiebt sich zu den langlebigen Nukliden hin.

Die Aktivitätskonzentration im Primärwasser nimmt gemäß der folgenden Bilanzgleichung zu oder ab.

$$V \frac{A_{V,i}}{dt} = R_i - \lambda_i V A_{V,i} - \eta_i \nu_i A_{V,i} - L A_{V,i}$$

Hierin bedeuten:

V	Masse des Primärwassers	in t
$A_{V,i}$	Konzentration des i-ten Nuklids	in Ci/t
$\lambda_i$	Zerfallskonstante des i-ten Nuklids	in $\text{s}^{-1}$
$R_i$	Quellstärke des i-ten Nuklids	in Ci/s
$\nu_i$	Reinigungsrate des Primärwassers	in t/s
$\eta_i$	Abscheidegrad bei der Reinigung für das i-te Nuklid	
L	Summe aller Leckagen aus dem Primärkreislauf	in t/s

Diese Bilanzgleichung hat die allgemeine Lösung

$$V A_{V,i}(t) = \left( \int_{t_0}^t R_i(t) \cdot e^{(\lambda_i + \eta_i \frac{\nu}{V} + \frac{L}{V}) dt + A_{V,i,t=0} \right) \cdot e^{-(\lambda_i + \eta_i \frac{\nu}{V} + \frac{L}{V}) t}$$

## 2.2 Ableitungspfade

Die Ableitungspfade der Edelgase und die dabei auftretenden Verzögerungszeiten sind von der jeweiligen Anlagenkonzeption abhängig, somit ist auch das zu erwartende ungünstigste Nuklidgemisch direkt von der gegebenen Kraftwerksanlage abhängig. Als Referenzanlage für die Ableitungspfade dient hier das Kernkraftwerk mit Druckwasserreaktor, "Typ Biblis C" /3/.

Die bei diesem Kernkraftwerk möglichen Edelgasableitungspfade ergeben sich aus Bild 1. Die Ableitungspfade sind:

- A Primärwasserreinigungsanlage - Abgasanlage - Kamin
- B Dampferzeugerheizrohrleckage - Kondensator - Kamin
- C Leckage aus Primärkreislauf - Anlagenräume des Reaktorgebäudes - Anlagenraumabluft - Kamin
- D Leckagen aus Primärwasserreinigungsanlagen innerhalb des Reaktorringraums - Ringraumabluft - Kamin
- E Leckagen aus Primärwasserreinigungsanlagen innerhalb des Reaktorhilfsanlagengebäudes - Hilfsanlagengebäudeabluft - Kamin

Das Edelgasspektrum in der Fortluft ergibt sich aus den Edelgasspektren und dem Beitrag zur Gesamtaktivitätsabgabe der verschiedenen Ableitungspfade.

### 2.2.1 A b g a s a n l a g e

Im Fall einer hohen Aktivitätsquellstärke im Reaktorkern bei gleichzeitigem Vorhandensein beträchtlicher Leckagen wird versucht werden, das Primärwasser möglichst sauber zu halten. Es ist daher bei der Berechnung der Edelgasaktivitätsabgabe von der maximal möglichen Reinigungsrate auszugehen. Die bei der Reinigung anfallenden Entgasungsprodukte werden der Abgasverzögerungsanlage zugeführt und dort entsprechend den der Auslegung zugrunde gelegten Verzögerungszeiten verzögert, bevor sie über den Kamin abgeleitet werden. Die abgeleitete Aktivität berechnet sich zu

$$A_i = A_{V,i} \cdot \nu \cdot \eta_i \cdot T \cdot e^{-\lambda_i t_{A,i}}$$

Hierin bedeuten:

$A_i$	abgeleitete Aktivität des Nuklids i über den Ableitungsweg A	in Ci/a
T	Vollastbetriebszeit innerhalb eines Jahres	in s/a
$t_{A,i}$	Verzögerungszeit für das Nuklid i auf dem Ableitungspfad A	in s

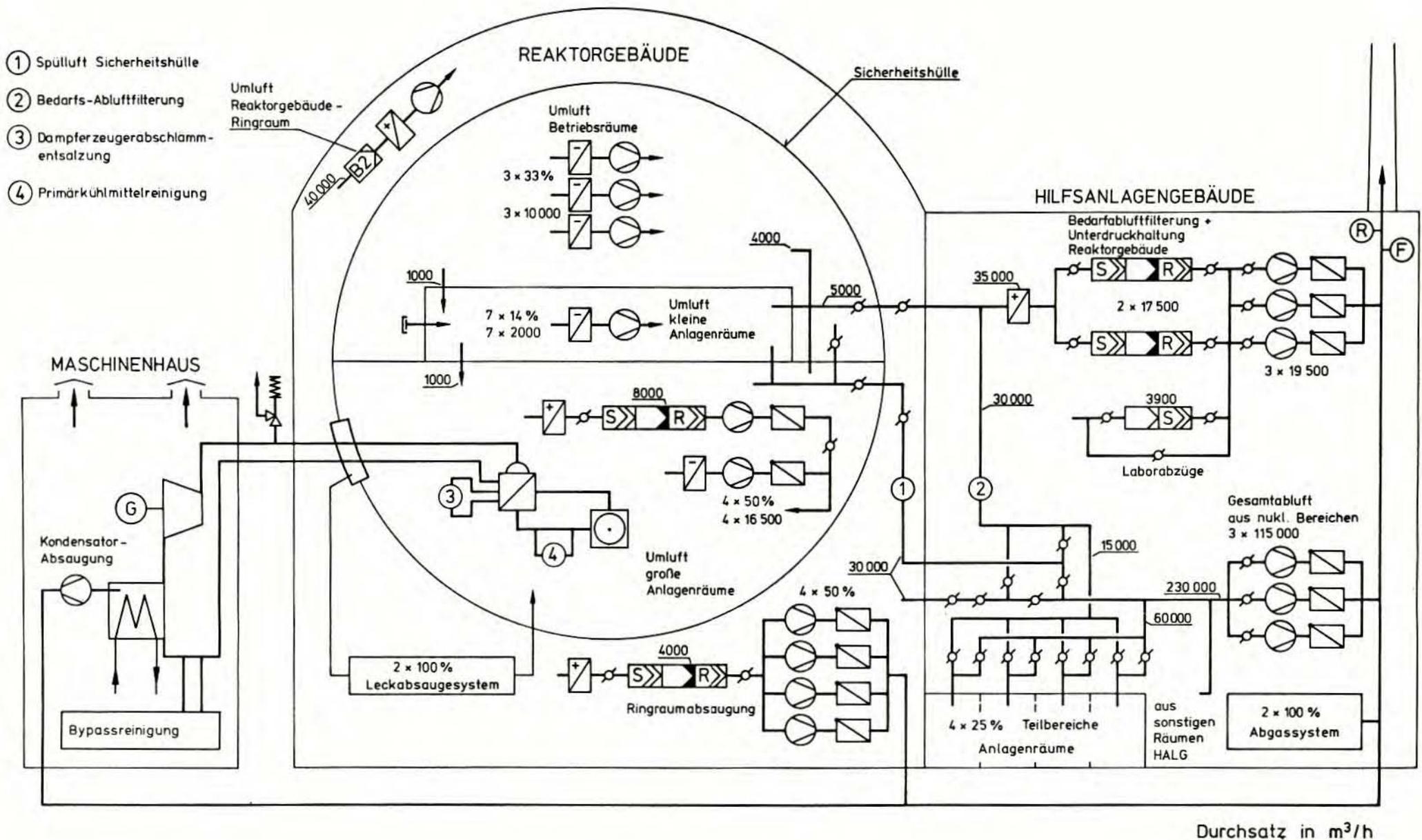


Bild 1: Rückhaltung radioaktiver Stoffe an Kernkraftwerken mit Druckwasserreaktor, Typ "Biblis C"

### 2.2.2 Dampferzeugerleckage

Die zulässige Dampferzeugerleckage hängt primär ab von der jeweils vorhandenen J-131-Aktivitätskonzentration im Primärwasser und der behördlich festgesetzten maximal zulässigen Jod-131-Aktivitätskonzentration im Sekundärkreislauf. Weiterhin ist die zulässige Dampferzeugerleckage abhängig von der Größe der Dampferzeuger, der Größe der Dampferzeugerabschlammungssalzungsrate, der Frischdampfproduktionsrate und der Dampfefeuchte. Die jeweils zulässige Dampferzeugerleckage errechnet sich zu

$$L_{Dzul} = \frac{A_{F,J} \cdot V_{DE}}{F_{FD} \cdot A_{V,J}} \left( \lambda_J + \frac{\nu_1 + \dot{V}_{FD} \cdot F_{FD} \cdot \alpha \cdot e^{-\lambda_J \cdot s}}{V_{DE}} \right),$$

wobei die zulässige Jod-131-Konzentration im Frischdampf  $A_{F,J}$  vorgegeben ist.

In der Gleichung bedeuten:

$L_{Dzul}$	zulässige Dampferzeugerleckage	in t/s
$A_{F,J}$	Jod-131-Aktivitätskonzentration im Sekundärkreislauf	in Ci/t
$A_{V,J}$	Jod-131-Aktivitätskonzentration im Primärwasser	in Ci/t
$V_{DE}$	Wassermasse in allen Dampferzeugern	in t
$F_{FD}$	Frischdampfefeuchte	in %
$\nu_1$	Durchsatz durch Dampferzeugerabschlammungssalzungsanlage	in t/s
$\dot{V}_{FD}$	Frischdampfaustrag aus Dampferzeugern	in t/s
$\alpha$	Durchsatz durch Kondensatreinigung als Bruchteil des Kondensatstromes	
$s$	Verweilzeit im Sekundärkreislauf außerhalb der Dampferzeuger	in s

Für die Spektrumberechnung kann als mittlere kontinuierliche Dampferzeugerleckage während der Dauer eines Brennstoffzyklus  $1/2 L_{Dzul}$  angesetzt werden. Für den Übertritt der Edelgase in den Sekundärkreislauf wird eine sofortige vollständige Entgasung des Dampferzeugerwassers angenommen. Die Edelgase werden mit einer Absaugrate  $\nu_B$  aus dem Kondensator, der ein freies Gasvolumen  $V_B$  besitzt, abgesaugt und unbehandelt dem Kamin zugeführt. Eine weitere Verzögerung ergibt sich auf dem Weg von den Dampferzeugern zum Kondensator und von diesem zum Kamin. Mit diesen Annahmen errechnet sich die Aktivitätsableitung über den Ableitungspfad B zu

$$B_i = \frac{A_{V,i} \cdot L_{DE}}{\lambda_i + \frac{\nu_B}{V_B}} \cdot \frac{\nu_B}{V_B} \cdot T \cdot e^{-\lambda_i t_B}$$

Hierin bedeuten:

$B_i$	abgeleitete Aktivität des Nuklids i über den Ableitungsweg A	in Ci/a
$L_{DE}$	Dampferzeugerleckage	in t/s
$v_B$	Absaugerate aus dem Kondensator	in m <sup>3</sup> /s
$V_B$	freies Gasvolumen im Kondensator	in m <sup>3</sup>
T	Vollastbetriebszeit innerhalb eines Jahres	in s/a
$t_B$	Verzögerungszeit auf dem Ableitungspfad B (Zeitspanne zwischen Eintritt in die Dampferzeuger und Austritt aus dem Kamin ohne den Aufenthalt im Kondensator)	in s

### 2.2.3 Primärkreisleckage innerhalb des Reaktorgebäudes

Für die Berechnung der auf diesem Weg abgeleiteten Edelgasaktivität wird von den Annahmen ausgegangen, daß das Primärwasser aus dem Primärkreislauf unverzögert in die Anlagenräume des Reaktorgebäudes freigesetzt wird und das austretende Primärwasser sofort vollständig entgast. Die Leckage kann auch dadurch gekennzeichnet sein, daß kein Wasserverlust entsteht, sondern nur die Edelgase entweichen, wie es bei Stopfbuchsabsaugungseinrichtungen der Fall sein kann. Die Edelgase werden, bedingt durch die hohe Umluftrate, sofort in der gesamten Anlagenraumluft gleichmäßig verteilt. Mit der Anlagenraumluft werden die Edelgase abgesaugt und dem Kamin zugeführt. Die Verzögerungszeit für die Edelgase wird dabei bestimmt durch das freie Volumen und die Abluftrate der Anlagenräume. Die Aktivitätsabgabe über den Ableitungspfad C errechnet sich zu

$$C_i = \frac{A_{v,i} \cdot L_c}{\lambda_i + \frac{v_c}{V_c}} \cdot \frac{v_c}{V_c} \cdot T$$

Hierin bedeuten:

$C_i$	abgeleitete Aktivität des Nuklids i über den Ableitungspfad C	in Ci/a
$L_c$	scheinbare Leckage aus dem Primärkreislauf in die Anlagenräume des Reaktorgebäudes	in t/s
$V_c$	freies Volumen der Anlagenräume	in m <sup>3</sup>
$v_c$	Abluftrate aus den Anlagenräumen	in m <sup>3</sup> /s

#### 2.2.4 Leckagen innerhalb des Reaktorgebäude-Ringraums

Innerhalb des Reaktorgebäuderingraums sind Teile der Primärwasserreinigungssysteme sowie Komponenten der Not- und Nachkühlssysteme untergebracht. Die Leckagen können in wässriger Form oder gasförmig aus diesen Kreisläufen auftreten. Im Fall von Wasserleckagen wird angenommen, daß beim Austritt aus dem Leck das Wasser sofort vollständig entgast wird. Weiterhin wird angenommen, daß sich die Edelgase sofort vollständig mit der Raumluft vermischen; danach werden sie mit der Ringraumabluft dem Kamin zugeführt. Die Verzögerungszeit wird dabei bestimmt durch das freie Volumen und die Abluftrate des Reaktorgebäuderingraums. Die Aktivitätsabgabe über den Ableitungspfad D errechnet sich zu

$$D_i = \frac{A_{v,i} \cdot L_D}{\lambda_i + \frac{\nu_D}{V_D}} \cdot \frac{\nu_D}{V_D} \cdot T$$

Hierin bedeuten:

$D_i$	abgeleitete Aktivität des Nuklids i über den Ableitungspfad D	in Ci/a
$L_D$	scheinbare Leckagen aus dem Primärkreislauf über Hilfskreisläufe in den Reaktorgebäuderingraum hinein	in t/s
$V_D$	freies Volumen des Reaktorgebäuderingraums	in m <sup>3</sup>
$\nu_D$	Abluftrate aus dem Reaktorgebäuderingraum	in m <sup>3</sup> /s

#### 2.2.5 Leckagen innerhalb des Reaktorhilfsanlagengebäudes

Im Reaktorhilfsanlagengebäude befinden sich Teile der Primärwasserreinigungs- und Primärwasseraufbereitungsanlage mit der nachgeschalteten Abgasanlage sowie die Dampferzeugerabschlamm-entsalzungsanlage. Die Edelgasfreisetzung aus den genannten Hilfskreisläufen, die Verteilung in der Raumluft und die Ableitung über den Kamin werden analog zu den Vorgängen im Reaktorgebäuderingraum gesehen.

Die Aktivitätsableitung über den Freisetzungspfad E errechnet sich zu:

$$E_i = \frac{A_{v,i} \cdot L_E}{\lambda_i + \frac{\nu_E}{V_E}} \cdot \frac{\nu_E}{V_E} \cdot T$$

Hierin bedeuten:

$E_i$	abgeleitete Aktivität des Nuklids $i$ über den Ableitungspfad $E$	in Ci/a
$L_E$	scheinbare Leckage aus dem Primärkreislauf über Hilfskreisläufe in das Reaktorhilfsanlagengebäude	in t/s
$V_E$	freies Volumen der Anlagenräume innerhalb des Reaktorhilfsanlagengebäudes	in $m^3$
$v_E$	Abluftrate der Anlagenräume innerhalb des Reaktorhilfsanlagengebäudes	in $m^3/s$

### 3. MÖGLICHE EDELGASSPEKTREN IN DER ABLUFT EINES KERNKRAFTWERKES MIT DRUCKWASSERREAKTOR, TYP BIBLIS C

Mit Hilfe der im Sicherheitsbericht für das Kernkraftwerk Biblis, Block C, zu findenden Daten wird untersucht, wie sich das Nuklidspektrum der abzuleitenden Edelgasaktivität bei der Variation

- der Aktivitätsquellstärke im Core,
- der Entgasungsrate des Primärkühlmittels und
- der Leckagemengen aus den verschiedenen Systemen

ändert.

Die zur Berechnung verwendeten Daten sind in der Tabelle 1, "Daten der Referenzanlage", der Tabelle 2, "Ableitungskombinationen und Leckagemengen" und der Tabelle 3, "Dosisumrechnungsfaktoren für  $\beta$ - und  $\gamma$ -Submersion" wiedergegeben. Bei Anwendung der in Abschnitt 2 dargestellten Rechenvorschrift ergeben sich damit die in Tabelle 4, "Nuklidspektren, zugehörige mittlere Dosisumrechnungsfaktoren und Aktivitätsabgaben" aufgeführten Ergebnisse.

#### 3.1 Diskussion der verwendeten Daten

##### Tabelle 1 "Daten der Referenzanlage"

Dem Sicherheitsbericht /3/ nicht entnehmbar waren die Daten über die zulässige Jod-131-Konzentration im Dampfkreislauf außerhalb der Dampferzeuger, die Luftwechselzahl im Kondensator und die freien Volumina in den einzelnen Gebäuden. Für die zulässige Jod-131-Konzentration im Dampfkreislauf wurde der Mittelwert der bisher üblichen Genehmigungswerte,  $10^{-7}$  Ci/ $m^3$  während der Weidezeit und  $10^{-6}$  Ci/ $m^3$  außerhalb der Weidezeit, verwendet. Die Luftwechselzahl im Kondensator wurde auf Grund der Erfahrungen am Kernkraftwerk Obrigheim - hier wurden Luftwechsel bis zu  $1/8$   $h^{-1}$  gemessen - konservativ zu  $1$   $h^{-1}$  angenommen. Die freien Volumina in den einzelnen Gebäuden wurden nach den im Sicherheitsbericht /3/ vorhandenen Zeichnungen abgeschätzt.

Tabelle 2 "Ableitungskombinationen und Leckagemessungen"

Die Auslegungsquellstärke aus dem Reaktorkern wurde, wie in Abschnitt 2 angegeben, berechnet; sie stimmt mit den in /3/ angegebenen Daten überein. Bei jeder Ableitungskombination, ausgenommen Fall i, wird der größtmögliche Durchsatz durch die Kühlmittelentgasung zugrunde gelegt, da bei Vorhandensein von Leckagen die Kühlmittelentgasung zur Verminderung der Aktivitätsableitung sicherlich betrieben werden wird. Die genannten Leckagen sind bis auf die Dampferzeugerheizrohrleckage - hier wurde die zulässige Leckage abgeschätzt - frei gewählt worden. Ein Vergleich mit den tatsächlich aufgetretenen Leckagen ist nicht möglich, da hierüber keine Daten vorliegen. Die Ergebnisse in Tabelle 4 zeigen aber, daß nur bei Vorhandensein verhältnismäßig hoher Leckagemengen Edelgasaktivitätsableitungen in der Höhe, wie sie bislang beantragt worden sind, auftreten können.

### 3.2 Diskussion der Ergebnisse

Für die in Tabelle 2 aufgeführten Ableitungskombinationen ergeben sich die verschiedenen Nuklidspektren mit den zugehörigen mittleren Dosisumrechnungsfaktoren und Edelgasaktivitätsabgaben. Das radiologisch günstigste Edelgasnuklidspektrum a ergibt sich, wenn außer der Aktivitätsfreisetzung aus den Brennelementen keinerlei Leckagen in der Anlage vorhanden sind. Das radiologisch ungünstigste Edelgasnuklidspektrum h ergibt sich durch große Leckagen im Bereich des Reaktorhilfsanlagengebäudes bei sonst dichten Systemen. Der Grund hierfür liegt darin, daß wegen der hohen Luftwechselzahl im Hilfsanlagengebäude ein verhältnismäßig großer Teil der kurzlebigen Edelgasisotope über den Kamin abgeleitet wird. Alle anderen Ableitungskombinationen ergeben Edelgasnuklidspektren mit Dosisumrechnungsfaktoren, die zwischen denen liegen, die sich bei den Spektren a und h ergeben. Die Dosisumrechnungsfaktoren für die Edelgasnuklidspektren b - g unterscheiden sich maximal um den Faktor 1,65 voneinander. Es kann also gesagt werden, daß eine Änderung der Ableitungskombination recht wenig Einfluß auf die Größe der mittleren Dosisumrechnungsfaktoren haben wird; dieses wird noch deutlicher gezeigt beim Vergleich der Ableitungskombinationen für die Spektren f und g, die über die Ableitungspfade B und C abgeleitete Aktivität unterscheidet sich jeweils um den Faktor 10, die mittleren Dosisumrechnungsfaktoren ändern sich aber kaum. Die Ableitungskombination h verdeutlicht, daß auch bei verhältnismäßig geringer Edelgasaktivitätsabgabe (3000 Ci/a) ein Edelgasnuklidspektrum mit hohen Dosisumrechnungsfaktoren auftreten kann.

### 3.3 Vergleich mit bisher gemessenen Edelgasnuklidspektren

Der Vergleich des Nuklidspektrums i mit den Meßwerten des Bundesgesundheitsamtes /4/ zeigt, daß diese Ableitungskombination die derzeitigen Gegebenheiten beim Kernkraftwerk Biblis, Block A,

recht gut wiedergibt. Das Fehlen von Kr-85 im Spektrum nach /4/ ist durch das Unterschreiten der Nachweisgrenze für Kr-85 bei der gewählten Meßanordnung zu erklären. Eine theoretische Betrachtung über den Anteil von Kr-85 in diesem Spektrum führt zu Werten zwischen 5 und 8 %. Bei den übrigen Edelgasnukliden kann demgegenüber eine relativ gute Übereinstimmung zwischen theoretisch ermittelten und tatsächlich gefundenem Spektrum festgestellt werden.

### 3.4 Nachvollziehung des von der Strahlenschutzkommission vorgeschlagenen Edelgasnuklidspektrums mit Hilfe des Rechenmodells

Das von der Strahlenschutzkommission vorgeschlagene Edelgasnuklidspektrum /5/ kann ebenfalls mit dem in Abschnitt 2 vorgestellten Rechenmodell nachvollzogen werden. Für ein Kernkraftwerk vom Typ Biblis C ergibt sich dieses Edelgasnuklidspektrum aus einem Zehntel der Auslegungsquellstärke aus dem Reaktorkern bei gleichzeitigem Stillstand der Primärkühlmittelentgasung und einer Primärkühlmittelleckage von 0,2 t/h innerhalb der Sicherheitshülle.

## 4. ZUSAMMENFASSUNG

In der vorliegenden Arbeit wurde ein mögliches Berechnungsmodell für die theoretische Ermittlung von Edelgasnuklidspektren in der Abluft von Kernkraftwerken mit Druckwasserreaktor "Typ Biblis C" vorgestellt. Mit Hilfe dieses Rechenmodells wurden Edelgasnuklidspektren für die unterschiedlichsten Ableitungskombinationen mit dem Ziel ermittelt, ein hinreichend konservatives Edelgasnuklidspektrum zu erhalten. Dabei konnte gezeigt werden, daß eine Edelgasaktivitätsabgabe von 3000 Ci/a (Ableitungskombination h) ein Edelgasnuklidspektrum mit höheren mittleren Dosisumrechnungsfaktoren bedingen kann als eine Edelgasaktivitätsabgabe von 80 000 Ci/a (Ableitungskombination g). Für ein Kernkraftwerk mit Druckwasserreaktor "Typ Biblis C" mit einer jährlichen Edelgasaktivitätsabgabe von 40 000 Ci kann folgendes Nuklidspektrum als hinreichend konservativ angesehen werden:

Kr	83m	-	2	%
Kr	85m	-	8	%
Kr	85	-	2	%
Kr	87	-	9	%
Kr	88	-	17	%
Kr	89	-	1	%
Xe	133m	-	0,5	%
Xe	133	-	19	%
Xe	135m	-	2	%
Xe	135	-	32	%
Xe	137	-	1,5	%
Xe	138	-	6	%

Für dieses Edelgasnuklidspektrum ergeben sich die mittleren Dosisumrechnungsfaktoren für die Dosisberechnung aus  $\beta$ - und  $\gamma$ -Submersion zu

$$g_{\beta} = 9,38 \cdot 10^{-2} \frac{\text{rem} \cdot \text{m}^3}{\text{Ci} \cdot \text{s}} \text{ und } g_{\gamma} = 10,2 \cdot 10^{-5} \frac{\text{rem} \cdot \text{m}^2}{\text{Ci} \cdot \text{s}}$$

Dieses Spektrum behält auch dann seine Gültigkeit, wenn entweder die Quellstärke im Core oder die Leckagemengen sich mit dem Faktor 10 verringern, d.h., dieses Spektrum gilt auch für eine Aktivitätsableitung von 4000 Ci/a.

Bei der theoretischen Ermittlung der Edelgasnuklidspektren wurden mehrere Dinge offensichtlich. So ist das Edelgasnuklidspektrum nicht unbedingt von der Höhe der Edelgasaktivitätsabgabe abhängig, sondern vielmehr von der Entgasungsrate des Primärkühlmittels und der Frischluftwechselzahl im Raum der Edelgasleckage. Die Größe der Leckagemengen aus dem Primärkreislauf und den nachgeschalteten Hilfssystemen, die zur Ausschöpfung der beantragten Werte der jährlichen Edelgasaktivitätsabgaben notwendig sind, lassen diese Antragswerte unbegründet hoch erscheinen. Durch die Erniedrigung der Frischlufttrate in den leakagegefährdeten Räumen kann eine Erniedrigung der Edelgasaktivitätsabgabe erzielt werden, wobei sich gleichzeitig die mittleren Dosisumrechnungsfaktoren für die dann auftretenden Nuklidspektren erniedrigen.

Aus diesen Erkenntnissen ist der Schluß zu ziehen, daß

- für jedes Kernkraftwerk das hinreichend konservative Edelgasnuklidspektrum unter Zugrundelegung des Anlagenaufbaus und der vorgesehenen Rückhaltesysteme zu ermitteln ist,
- die Genehmigungswerte für die Edelgasaktivitätsabgabe erniedrigt werden können und
- die Frischluft in leakagegefährdeten Räumen während des Leistungsbetriebs möglichst gering gehalten werden sollte.

5. TABELLEN

Tab. 1:

"Daten der Referenzanlage"

Druckwasserreaktor, Typ Biblis C, mit einer thermischen Leistung von 3675 MW <sub>th</sub>	
Leistungsverfügbarkeit	80 %
Wasservolumen des Primärkreislaufs	403 t
A Verzögerungszeiten in der Abgasanlage	
- für Xenon	40 d
- für Krypton	40 h
B Zulässige Dampferzeugerleckage bei Auslegungsleckage aus dem Kern	
- vollem Lauf der Kühlmittelreinigung und -Entgasung	70 t/h
- Wassermasse in allen 4 Dampferzeugern	280 t
- Dampffeuchte	0,1 %
- Abschlämmrate aus Dampferzeugern	70 t/h
- Dekontaminationsfaktor der Abschlammment-salzungsanlage	10 <sup>2</sup>
- Frischdampftrate	2 t/s
- mittlere zulässige Jod-131-Aktivitätskonzentration im Sekundärkreislauf	5 · 10 <sup>-7</sup> Ci/t
ergibt sich zu	380 kg/h
Die Luftwechszelzahl im Kondensator wird mit 1 h <sup>-1</sup> angenommen, damit ergibt sich der Quotient aus $v'_B$ und $v_B$ zu	1/3600 s <sup>-1</sup>
C Anlagenräume innerhalb der Sicherheitshülle	
- freies Volumen	10 000 m <sup>3</sup>
- Abluftrate	1 000 m <sup>3</sup> /h
D Ringraum des Reaktorgebäudes	
- freies Volumen	30 000 m <sup>3</sup>
- Abluftrate	30 000 m <sup>3</sup> /h
E Reaktorhilfsanlagengebäude	
- freies Volumen der Anlagenräume	7 000 m <sup>3</sup>
- Abluftrate der Anlagenräume	60 000 m <sup>3</sup> /h

Tab. 2:

"Ableitungskombinationen und Leckagemengen"

	ABLEITUNGSKOMBINATION									
	a	b	c	d	e	f	g	h	i	SSK
Anteil der Auslegungsquellstärke aus dem Kern	1	1	1	1	1	1	1	1/10	1/10	1/10
A Kühlmittelentgasung in t/h	70	70	70	70	70	70	70	70	0 <sup>+</sup> )	0 <sup>+</sup> )
B Dampferzeugerheizrohrleckage in kg/h	-	190	-	190	-	19	190	-	-	-
C scheinbare Leckage aus dem Primärkreislauf in die Anlagenräume in t/h	-	-	1	1	1	0,1	1	-	0,02	0,2
D scheinbare Leckage aus dem Primärkreislauf über Reinigungskreisläufe im Reaktorgebäude-Ringraum in t/h	-	-	-	-	0,5	0,5	0,5	-	0,01	-
E scheinbare Leckage aus dem Primärkreislauf über Reinigungskreisläufe im Reaktorhilfsanlagegebäude in t/h	-	-	-	-	-	0,25	0,5	0,5	0,01	-

+ ) einmalige Entgasung vor Öffnen des Reaktordruckbehälters

Tab. 3:

"Dosisumrechnungsfaktoren für  $\beta$ - und  $\gamma$ -Submersion" nach /5/

N u k l i d	$\gamma$ -Submersion in $10^{-5} \frac{\text{rem} \cdot \text{m}^2}{\text{Ci} \cdot \text{s}}$	$\beta$ -Submersion in $10^{-2} \frac{\text{rem} \cdot \text{m}^3}{\text{Ci} \cdot \text{s}}$
Kr 83 m	2,2	0
85 m	3,5	4,9
85	0,034	4,3
87	15	29
88	34	8,4
89	28	54
Xe 131 m	1,5	0,18
133 m	1,4	0,88
133	1,4	1,2
135 m	7,0	1,5
135	3,8	6,4
137	2,4	42
138	13	23
139	6,8	72

Tab. 4:

"Nuklidspektren, zugehörige mittlere Dosisumrechnungsfaktoren und Aktivitätsabgaben"

N u k l i d	Anteil in % bei Ableitungskombination					
	a	b	c	d	e	f
Kr 83 m	-	2	1	1,5	2	2
85 m	13	9	8	8	8	8
85	20,5	7	3	2,5	2	2
87	-	6	4	5	6	9
88	1	13	12	13	15	17
89	-	-	-	-	-	1
Xe 131 m	2	1	-	-	-	-
133 m	-	-	1	1	1	0,5
133	63,5	31	33	29	25	19
135 m	-	3	-	1	1	2
135	-	25	37	37	37	32
137	-	-	-	-	-	1,5
138	-	3	1	2	3	6
$g_{\beta}$ in $\frac{\text{rem} \cdot \text{m}^3}{\text{Ci} \cdot \text{s}} \cdot 10^{-2}$	2,37	6,48	5,69	6,24	6,86	9,38
$g_{\gamma}$ in $\frac{\text{rem} \cdot \text{m}^2}{\text{Ci} \cdot \text{s}} \cdot 10^{-5}$	1,72	7,68	6,99	7,64	8,55	10,2
Aktivitätsabgabe in Ci/a	4 000	12 000	27 000	36 000	49 000	44 000

Tab. 4: Fortsetzung

"Nuklidspektren, zugehörige mittlere Dosisumrechnungsfaktoren und Aktivitätsabgaben"

N u k l i d	Anteil in % bei Ableitungskombination			Meßwert Biblis A /4/	Vorschlag SSK /5/
	g	h	i		
Kr 83 m	2	2	-	-	-
85 m	8	8	2	2	2
85	1	2,5	8	-	2
87	8	9	1	0,7	1
88	16	16	3	0,7	2,5
89	1	2	-	-	-
Xe 131 m	-	-	-	-	2
133 m	1	-	1	3	-
133	20	19	69	80	80
135 m	2	3	-	0,4	-
135	35	27	15	13	10
137	1	2,5	-	-	-
138	5	9	1	-	0,5
$g_{\beta}$ in $\frac{\text{rem} \cdot \text{m}^3}{\text{Ci} \cdot \text{s}} \cdot 10^{-2}$	8,73	10,7	3,01	2,10	2,42
$g_{\gamma}$ in $\frac{\text{rem} \cdot \text{m}^3}{\text{Ci} \cdot \text{s}} \cdot 10^{-5}$	9,68	10,4	2,92	2,18	2,67
Aktivitätsabgabe in Ci/a	86 000	3 200	1 300	1 200	5 300

6. LITERATURVERZEICHNIS

- /1/ USNRC Regulatory Guide 1.112:  
Calculation of Releases of Radioactive Materials in  
Gaseous and Liquid Effluents from Light-Water-Cooled  
Power Reactors
- /2/ Schrüfer, E.:  
Strahlung und Strahlungsmeßtechnik in Kernkraftwerken  
Kapitel 7, Nachweis von Brennelementschäden  
Elitera-Verlag, Berlin, 1974
- /3/ Kraftwerk Union AG:  
Sicherheitsbericht, Kernkraftwerk Biblis, Block C/D,  
2 x 1300-MWe-Kernkraftwerk mit Druckwasserreaktor für  
Rheinisch-Westfälisches Elektrizitätswerk AG, Essen,  
März 1975
- /4/ Winkelmann, I., und R. Haubelt:  
Messung der Nuklidzusammensetzung radioaktiver Edel-  
gase in der Fortluft des Kernkraftwerks Biblis, Block A  
Institut für Strahlenhygiene, Neuherberg, Januar 1977
- /5/ Der Bundesminister des Innern:  
Empfehlungen der Strahlenschutzkommission: Allgemeine  
Berechnungsgrundlagen für die Bestimmung der Strahlen-  
exposition durch Emission radioaktiver Stoffe mit der  
Abluft  
Bonn, Oktober 1977

