

Abgassysteme in Kernkraftwerken mit Siedewasserreaktoren

Mladen Macekovic, Baden

Die zulässige Abgabe radioaktiver Abgase aus den Kernkraftwerken wird heute von den Behörden auf sehr niedrige Werte begrenzt. Das von Brown Boveri angewendete Verfahren für die Abgasaufbereitung gewährleistet eine sichere Ableitung radioaktiver Gase unter Einhaltung der restriktiven behördlichen Bestimmungen bei verschiedenen Betriebsbedingungen.

Einleitung

Die zurzeit von Brown Boveri in Bau oder in Planung befindlichen 1000-MW-Kernkraftwerke (KKW) mit Siedewasserreaktoren werden mit zum Teil bereits erprobten Abgassystemen ausgerüstet. Diese basieren auf der Weiterentwicklung und der technischen Verbesserung der schon im Betrieb bewährten Systeme der KKW Mühleberg und Barsebäck.

Das neue Abgassystem hat einen Dekontaminationsfaktor von ca. 10^3 , bezogen auf die Frischdampfaktivität nach einer 30minütigen Verzögerungszeit. Es ermöglicht auch bei undichten Brennelementen eine kontinuierliche Abgabe der Abgase über den Kamin in die Umgebung, ohne dass die Kraftwerkleistung reduziert werden muss. Die Aktivität der vom Abgassystem abgegebenen Gase liegt bei angenommenen Auslegungsschäden an Brennelementen unter den von den Strahlenschutzbehörden in neuester Zeit verlangten sehr restriktiven Grenzwerten.

Zusammensetzung der Abgase

Die im Turbinenkondensator gesammelten nichtkondensierbaren Gase werden durch einen mehrstufigen Dampfstrahlsauger kontinuierlich aus dem Kondensator abgesaugt und dem Abgassystem zur Aufbereitung zugeleitet. Das dem Abgassystem zugeführte Gasgemisch besteht aus Luft, Treibdampf aus der letzten Stufe des Dampfstrahlsaugers, Spaltgasen aus den Brennelementen, radioaktiven Gasen aus dem Reaktorwasser und aus Knallgas.

Die abgesaugte Luft aus dem Turbinenkondensator gelangt durch verschiedene Leckagen in das Kondensationssystem. Die Luftmenge ist abhängig von der Kondensator konstruktion und beträgt im Normalbetrieb etwa 30 bis 40 kg/h.

Das Knallgas entsteht proportional der Reaktorleistung durch Radiolyse des Reaktorwassers, wobei die maximale Knallgasmenge bei 1000 MW im Normalbetrieb etwa 19 kg/h H_2 und 153 kg/h O_2 beträgt.

Die Erzeugungsrate der radioaktiven Gase aus dem Reaktorwasser wie N^{13} , N^{16} , N^{17} , O^{19} und F^{18} ist eben-

falls von der Reaktorleistung abhängig; nur ist die Menge dieser Gase im Vergleich zur Knallgasmenge sehr klein.

Die Spaltgase, vor allem Isotopen von Krypton und Xenon, gelangen durch die undichten Stellen aus den Brennelementen in das Reaktorwasser. Das Abgassystem ist so ausgelegt, dass auch bei einer Frischdampfaktivität von 100000 $\mu Ci/s$ – gemessen nach einer 30minütigen Abklingzeit, was einem Prozentsatz von ca. 1% Brennelementschaden entspricht – der Normalbetrieb des Kernkraftwerkes gewährleistet wird.

Auslegungskriterien

Zur Herabsetzung der Abgabeaktivität an die Umwelt wird das aus dem Dampfstrahlsauger austretende radioaktive Gasgemisch durch folgende Verfahren aufbereitet:

- Rekombination von H_2 und O_2
- Kondensation von Wasserdampf
- Kühlen
- Verzögerung des gesamten Gasstromes in einer Abklingstrecke
- Trocknen durch Abkühlen
- Dynamische Adsorption der Edelgase in einer Aktivkohlekolonne
- Mechanische Filtrierung von Aerosolen

Alle Systemkomponenten werden für einen 15fachen Normalluftdurchsatz ausgelegt, so dass die erhöhten Luftmengen, die beim Teilvakuumbruch und beim Anfahren der Turbine auftreten, keine unzulässige Aktivitätsabgabe verursachen.

Neben den Anforderungen möglichst kleiner Aktivitätsabgaben wurde beim Aufbau des Abgassystems sein direkter Einfluss auf die Verfügbarkeit des Kraftwerkes berücksichtigt. Die wichtigsten und die störanfälligen Komponenten werden aus diesem Grund entweder doppelt oder mit genügender Leistungsreserve ausgeführt.

Nachfolgend seien die installierten Leistungsreserven der wichtigsten Komponenten aufgezählt:

100% Leistungsreserve:

- Rekombinator
- Abgaskondensator
- Nachkühler
- Absolutfilter
- Vakuumpumpe
- Kaltwassersatz

50% Leistungsreserve:

- Kälteaggregat mit Gastrockner

25% Leistungsreserve:

- Aktivkohlekolonne (1 Filterbehälter in Reserve)

Das Abgassystem ist mit einem umfangreichen Überwachungssystem ausgerüstet. An verschiedenen Stellen im System werden Grössen gemessen wie Temperatur, Druck, H_2 -Konzentration, Feuchtigkeit, Gasdurchsatz und γ - und β -Aktivität. Bei Überschreiten der eingestellten Werte wird zuerst auf die der Reserve dienende Komponente umgeschaltet. Wird der Grenzwert auch dann überschritten, setzt man die Anlage bzw. das Kraftwerk ausser Betrieb.

Das Abgassystem wird unter leichtem Unterdruck betrieben, um ein Entweichen von radioaktiven Gasen nach aussen zu verhindern.

Funktionsbeschreibung des Abgassystems

Das vereinfachte Flusschema, mit den für die Abgasaufbereitung wichtigen Komponenten, ist in *Bild 1* dargestellt.

Das Gas-Wasserdampf-Gemisch aus der letzten Stufe des Dampfstrahlsaugers wird zuerst in einen der beiden Rekombinatoren geleitet, in dem die katalytische Verbrennung von Wasserstoff bei etwa $350^\circ C$ stattfindet. Das katalytisch aktive Material ist Palladium, das auf einen metallischen oder keramischen Träger aufgedampft ist. Durch die Rekombination von Wasserstoff und Sauerstoff wird die Menge der nichtkondensierbaren Gase wesentlich reduziert. Die Betriebstemperatur des Rekombinators wird durch das Beimischen von Zusatzdampf konstant gehalten.

Für Inbetriebsetzung und Betriebsbereithalten sind die Rekombinatoren mit einer geschlossenen Stillstandheizung, bestehend aus Umwälzgebläse und elektrischem Erhitzer, ausgerüstet. Die Stillstandheizung hält das Katalysatorbett temperaturgesteuert auf ca. $130^\circ C$.

Der Rekombinator und die dazugehörigen Rohrleitungen sind gegen unzulässigen Überdruck durch eine Berstscheibe geschützt, die bei Zerstörung die Gase an den Turbinenkondensator abgibt.

Die durch die katalytische Verbrennung erzeugte Wärme wird im nachgeschalteten Abgaskondensator entzogen und die gesamte Dampfmenge niedergeschlagen. Die weitere Abkühlung des feuchten Gases erfolgt im Nachkühler. Das anfallende Kondensat aus dem Abgaskondensator und Nachkühler wird über ein Regelventil dem Turbinenkondensator zugeführt. Der Abgaskondensator wird mit Hauptkondensat und der Nachkühler mit Kaltwasser aus dem systemeigenen Kaltwassersatz gekühlt.

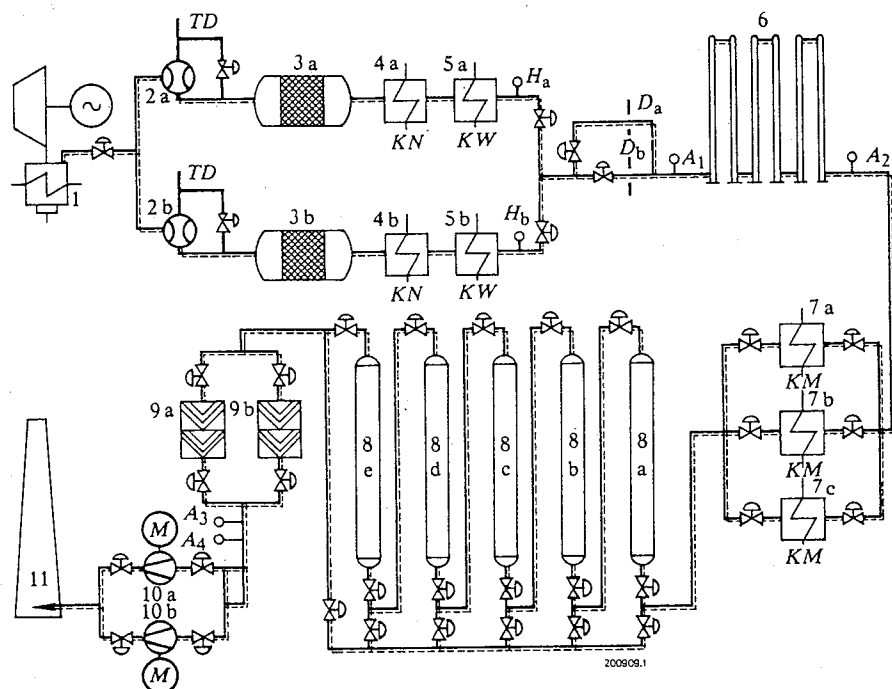
Durch eine H_2 -Messung nach dem Nachkühler wird die Wirksamkeit des Katalysators kontinuierlich überprüft. Bei Überschreiten des zulässigen Wertes wird im Kommandoraum ein Alarm ausgelöst und sogleich auf den Reserve-Rekombinatorzweig umgeschaltet.

Nach dem Nachkühler werden die Luftdurchsätze bei Normalbetrieb und bei transientem Betrieb gemessen. Bei transientem Betrieb wird der Luftdurchsatz durch eine in die Verbindungsleitung Hauptkondensator-Dampfstrahlsauger eingebaute Regelklappe auf einen einstellbaren Wert begrenzt.

Nach der Luftdurchsatzmessung durchströmt das Abgas

Bild 1 - Schema des Abgassystems

- A_1, A_2, A_3 = γ -Aktivitätsüberwachung
- A_4 = β -Aktivitätsüberwachung
- $D_{a, b}$ = Durchflussmessung
- $H_{a, b}$ = H_2 -Messung
- KN = Kondensat
- KM = Kältemittel
- KW = Kaltwasser
- TD = Treibdampf
- 1 = Hauptkondensator
- 2a, b = Dampfstrahlsauger
- 3a, b = Rekombinator
- 4a, b = Abgaskondensator
- 5a, b = Nachkühler
- 6 = Abklingstrecke
- 7a, b, c = Gastrockner
- 8a, b, c, d, e = Aktivkohlefilter
- 9a, b = Absolutfilter
- 10a, b = Vakuumpumpe
- 11 = Kamin



die Abklingstrecke, in welcher die meisten kurzlebigen Radionuklide zerfallen. Die Abklingzeit beträgt bei Normalbetrieb mindestens 15 min.

Vor dem Eintritt in die Aktivkohlekolonne wird das Abgas durch Abkühlen auf ca. -30°C getrocknet. Die Abkühlung des Abgases wird durch einen Gastrockner, in dem das Kältemittel verdampft, erreicht. Die Kältemittelversorgung erfolgt durch ein Kälteaggregat. Damit eine kontinuierliche Kühlung und Trocknung des Abgases gewährleistet ist, werden zwei Kälteaggregate wechselweise betrieben. Ein drittes Kälteaggregat mit dazugehörigem Gastrockner ist in Reserve.

Nach der Trocknung strömt das Abgas durch die Aktivkohlekolonne, in der die Edelgase durch dynamische Adsorption bei Raumtemperatur relativ zur Luft verzögert werden. Beim Durchströmen von 4 Aktivkohlefiltern wird für Xenon eine Verzögerungszeit von 40 Tagen erreicht. Der 5. Aktivkohlefilter steht als 25prozentige Reserve zur Verfügung.

Die nach der Aktivkohlekolonne eventuell noch auftretenden, staubförmigen Verunreinigungen werden in einem der beiden Absolutfilter beseitigt. Auch nach dem Absolutfilter wird die Abgasaktivität kontinuierlich überwacht, und bei Überschreitung des zulässigen Wertes wird das Kraftwerk abgeschaltet.

Die am Ende des Abgassystems installierte Vakuumpumpe sorgt für einen leichten Unterdruck im ganzen Abgassystem und dient der Förderung des Abgases in den Kamin.

Auswahl der Aktivkohle

Eine Voraussetzung für die richtige Auslegung der Aktivkohlekolonne ist die Bestimmung der dynamischen Adsorptionskoeffizienten für die radioaktiven Spaltgase Krypton und Xenon unter Berücksichtigung der im Betrieb herrschenden Bedingungen. Die allgemein für die verschiedenen Aktivkohletypen bekannten statischen Adsorptionsisothermen sind für die Auslegung von Verzögerungstrecken nicht ausreichend.

Die wichtigsten auf die Verzögerungswerte wirkenden Parameter wie Temperatur, Druck, Feuchtigkeit, Kerngröße, Strömungsgeschwindigkeit und Aktivkohletyp wurden deswegen von Brown Boveri durch umfangreiche Versuche ermittelt. Auf Grund dieser Versuche wurde es möglich, einige Aktivkohletypen mit sehr günstigem Verhältnis Druckverlust/Verzögerungszeit für Edelgase zu bestimmen. In *Bild 2* ist das erforderliche Volumen der Aktivkohlekolonne als Funktion der Adsorptionstemperatur für verschiedene Aktivkohletypen dargestellt. Diese Optimierung wurde für eine Verzögerung der Xenon-Abgabe von 40 Tagen und für Krypton von 2,4 Tagen unter Berücksichtigung der Versuchsergebnisse und der im Betrieb herrschenden Bedingungen durchgeführt.

Trocknung der Aktivkohle

Der erhöhte Feuchtigkeitsgehalt der Aktivkohle hat eine ungünstige Wirkung auf die dynamische Adsorption radioaktiver Edelgase. Der Wassergehalt der Aktivkohle wird aus diesem Grunde unterhalb 1% (Gew.) gehalten. Zum Trocknen der eventuell nassgewordenen Aktivkohle

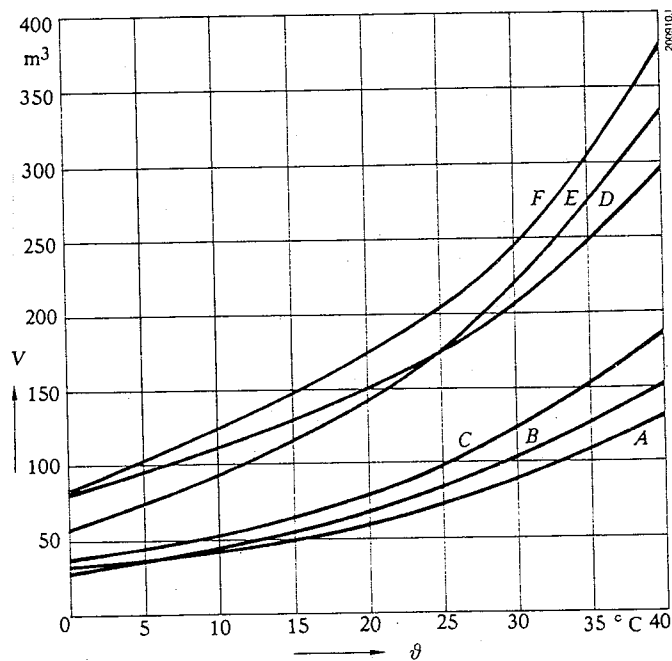
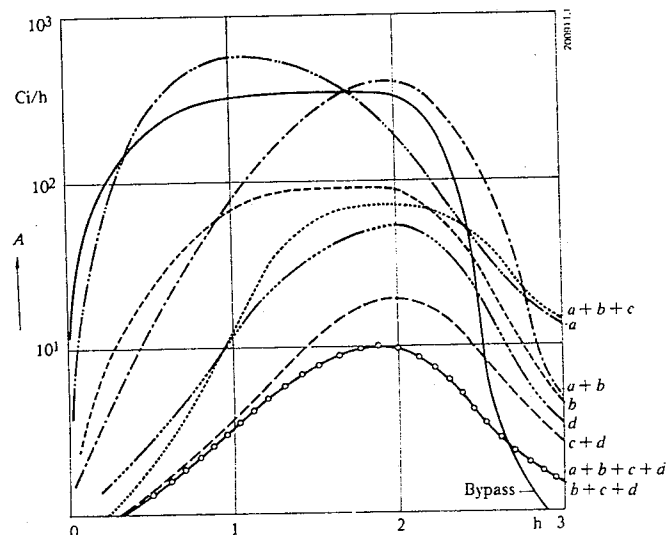


Bild 2 – Volumen V der Aktivkohlekolonne als Funktion der Adsorptionstemperatur θ für Aktivkohletypen A, B, C, D, E und F nach Versuchen von Brown Boveri

Verzögerungszeit: 40 Tage für Xenonisotope
2,4 Tage für Kryptonisotope

ist ein geschlossener Trocknungskreislauf, bestehend aus Umwälzgebläse, Gaserhitzer und Gaskühler, der mit dem Kaltwasser aus dem Kaltwassersatz beaufschlagt wird, vorgesehen. Der Trocknungskreislauf kann während des Betriebes auf jeden ausgeschalteten Filterbehälter angeschlossen werden. Nach beendetem Trocknungsprozess wird der Trocknungskreislauf bei ausgeschaltetem Gaserhitzer so lange in Betrieb gehalten, bis die während der Trocknung warmgewordene Aktivkohle durch das zirkulierende gekühlte Gas wieder die notwendige Adsorptionstemperatur von 25°C erreicht.

Bild 3 – Aktivitätsausstoss A in den ersten 3 Stunden nach dem Teilvakuumbruch für verschiedene Schaltungen a...d der Aktivkohlebehälter



Verhalten des Abgassystems bei transientem Betrieb

Das Abgassystem ist auch für kurzzeitig erhöhte Luftanfalle, die bei Anfahren der Anlage und bei Teilvakuumbruch auftreten, ausgelegt. Bei den ersten Untersuchungen über die Auswirkung beider transienten Vorgänge auf die Abgabe radioaktiver Abgase an die Umgebung hat sich gezeigt, dass beim Anfahren der Anlage die Aktivkohlekolonne ohne weiteres umgangen werden kann, während beim Teilvakuumbruch die zu verwendende Schaltung der Abgaskomponenten und der zulässige Luftanfall sorgfältig zu überprüfen sind. Zu diesem Zweck wurde unter Heranziehen der Ergebnisse der Aktivkohleversuche ein Rechenprogramm aufgestellt. Bei der Auswertung der Rechenresultate wurde festgestellt, dass der Luftanfall auf die ca. 15fache Menge desjenigen bei Normalbetrieb begrenzt werden muss. Eine günstige Schaltung der Aktivkohlebehälter, bei der die niedrigsten Aktivitätsabgabewerte einer nicht zu hohen Isotopenenergie entsprechen, stellt die Verwendung der Aktivkohlefilterkombination $b + c + d$ bzw. $a + b + c + d$ dar. Für die Auslegung wurde die letzte Kombination ausgewählt, um die Normalbetriebschaltung der Aktivkohlebehälter beizubehalten. Bei der Filterkombination $b + c + d$ wird allerdings die dem Normalbetrieb entsprechende Aktivitätsabgabe etwas früher auftreten; diese Schaltung benötigt aber ein kompliziertes Aus- und Einschalten des Aktivkohlebehälters a während des Teilvakuumbruches. Einige Ergebnisse dieser Berechnungen sind in *Bild 3* dargestellt.

Schlussfolgerung

Die redundante Ausführung der wichtigsten Komponenten im Abgassystem gewährleistet einen sicheren und kontinuierlichen Betrieb des Kernkraftwerkes. Das ganze System ist so aufgebaut, dass auch die transienten Vorgänge kein Abschalten der Anlage verursachen und eine eventuell erhöhte Abgabe der radioaktiven Gase unter den zulässigen Grenzwerten bleibt.

Anschließend sei noch vermerkt, dass während des Kernkraftwerkbetriebes mit einer Aktivität des Reaktordampfes, gemessen nach 30minütiger Verzögerungszeit, von weniger als $100000 \mu\text{Ci/s}$ zu rechnen ist. Dadurch wird auch die Ableitung radioaktiver Stoffe aus dem Abgassystem an die Umgebung immer niedriger sein als die auf Grund von möglichen Auslegungsschäden an Brennelementen berechneten und behördlich als zulässig geltenden Werte.