

**Zeitschrift:** Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

**Herausgeber:** Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

**Band:** 91 (2000)

**Heft:** 21

**Artikel:** Neue Ansätze in der Entwicklung konventioneller Spaltreaktoren

**Autor:** Krebs, Wolf-Dieter / Schneider, Dieter / Brettschuh, Werner

**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-855612>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

**Download PDF:** 15.05.2025

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

# Neue Ansätze in der Entwicklung konventioneller Spaltreaktoren

Trotz der gegenwärtig in Deutschland eingeschlagenen Ausstiegspolitik werden die Entwicklungen des Siedewasserreaktors SWR 1000 als innovatives Reaktorkonzept und des Europäischen Druckwasserreaktors EPR mit seinem evolutionären Ansatz weitergeführt, um für die Zukunft vorbereitet zu sein, wenn Ersatzenergie nach Erreichen der Lebensdauer der gegenwärtig betriebenen Reaktoren benötigt wird. Alle Prognosen, die auf rationaler Überlegung aufbauen, sehen für die Zukunft nur in einem Energiemix unter Einschluss der Kernenergie eine realistische Möglichkeit für die ausreichende Bereitstellung sicherer, umweltfreundlicher und wirtschaftlicher elektrischer Energie.

Der Grund, warum beide Baulinien parallel entwickelt werden, ist, Stromerzeugungskosten wettbewerbsfähig über einen grösseren Leistungsbereich anbieten zu können. Der Siedewasserreaktor SWR 1000 deckt den mittleren Leis-

## Adressen der Autoren

Dr. Wolf-Dieter Krebs und Dieter Schneider  
Siemens Nuclear Power GmbH  
D-91058 Erlangen, Werner Bretschuh  
Siemens Nuclear Power GmbH  
D-63067 Offenbach

tungsbereich um 1000 MW ab, während der Europäische Druckwasserreaktor EPR im höheren Leistungsbereich von 1500 bis 1800 MW eingesetzt werden soll. Beim EPR wird das wirtschaftliche Ziel niedriger Stromerzeugungskosten je kWh trotz steigenden Sicherheitsanforderungen u.a. durch die Kostendegression in den hohen Leistungsbereich erreicht. Bei der technischen Ausführung wurde weitgehend auf betriebsbewährte Komponenten und Systeme zurückgegriffen.

Beim SWR 1000 wird ein anderer Weg eingeschlagen: Zunächst werden auch bei diesem Typ für betriebswichtige Komponenten und Systeme bewährte Konstruktionen eingesetzt. Für die Sicherheitssysteme kommen jedoch völlig neue, passiv wirkende Komponenten und Systeme zum Einsatz. Durch die Kombination vereinfachter Sicherheitssysteme in Ver-

bindung mit betriebsbewährten, weitestgehend genormten Betriebssystemen wird eine gleich hohe Wettbewerbsfähigkeit in Bezug auf die Stromerzeugungskosten wie jene des EPR erreicht. Die Entwicklungsziele beider Baulinien können wie folgt zusammengefasst werden:

- Verbesserung des Konzeptes der gestaffelten Sicherheitsebenen
- einfache und übersichtliche Technik unter Einbezug von Betriebserfahrungen

- weitere Reduzierung der Kernschmelzwahrscheinlichkeit und zusätzlich
- Beherrschung von postulierten Kernschmelzunfällen
- Konkurrenzfähigkeit zu anderen Energieträgern
- hohe Betriebsflexibilität.

## Entwicklungsstand

### EPR

Von der deutschen und französischen Industrie unter Framatome und Siemens, gemeinsam mit dem französischen Energieerzeuger EDF und den grössten Elektrizitätsversorgungsunternehmen Deutschlands, wird das Projekt als evolutionäre Weiterentwicklung der betriebsbewährten DWR-Baulinie unter Berücksichtigung der deutsch-französischen Betriebserfahrung aus über 100 Anlagen durchgeführt. Erstmals werden schon bei der Konzeptfindung probabilistische Methoden zur Überprüfung der Ausgewogenheit des Sicherheitskonzeptes eingesetzt. Diese Strategie ist in einem evolutionären Konzept besonders gut überschaubar und transparent zu verfolgen.

Auf einige Entwicklungsergebnisse, die für den EPR besonders charakteristisch sind und die deutliche Verbesserungen gegenüber den bestehenden, in Betrieb befindlichen Anlagen darstellen, wird im Folgenden in einer Zusammen-

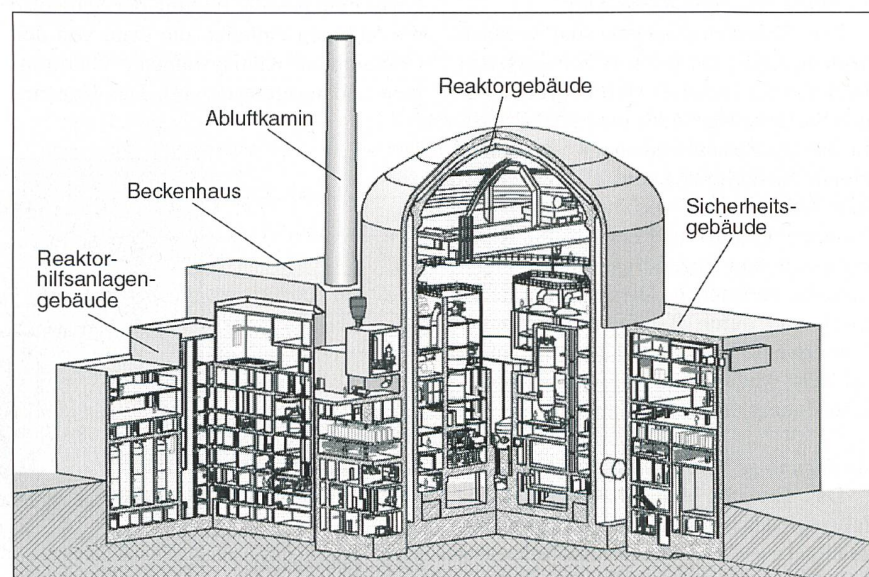


Bild 1 Gebäudeanordnung

fassung der wesentlichen Sicherheitsmerkmale eingegangen.

## Doppelcontainment mit Ringraumabsaugung

Der Primärkreis des EPR wird durch ein Spannbetoncontainment umschlossen, das gegen den Druckaufbau sowohl der klassischen Auslegungsstörfälle (Leckstörfälle) als auch für Drucktransienten als Folge angenommener Kernschmelzunfälle ausgelegt ist. Zusätzliche Auslegungsreserven erlauben lange Karenzzeiten (von 12–24 h), bevor Massnahmen zur Druckbegrenzung und Wärmeabfuhr aus dem Containment erforderlich werden. Die Wärme wird durch ein völlig unabhängiges Kühlsystem mit eigener Notstromversorgung abgeführt, das sowohl zur Wärmeabfuhr als auch zum gezielten Druckabbau im Containment eingesetzt werden kann. Das Spannbetoncontainment wird von einem zweiten, schlaff bewehrten Containment umgeben, das einerseits als Schutzbarriere gegenüber Einwirkungen von aussen (Flugzeugabsturz, Druckwellen) dient, zum anderen können durch den entstehenden Zwischenraum eventuelle Leckagen des Primärcontainments vor Abgabe in die Atmosphäre einer Filteranlage zuführt werden. Der Zwischenraum steht unter ständigem Unterdruck, so dass auch bei Ausfall der Filteranlage die Leckagekontrolle mindestens 6 h fortbesteht. Die maximal mögliche Abgabe an Radioaktivität ist damit auch im Falle von Kernschmelzunfällen so niedrig, dass anlagenexterne Katastrophenschutzmassnahmen nicht mehr notwendig sind (Verbleiben in Häusern, Ausgabe von Jodtabletten, Evakuierung, Umsiedlung).

## Vierfach getrennte Redundanz

Die Sicherheitssysteme sind vierfach vorhanden, wobei jedes einzelne System in einem der ebenfalls vierfach vorhandenen Sicherheitsgebäude untergebracht ist. In diesem Zusammenhang werden unter einem Sicherheitssystem alle zugehörigen Anlagen wie verfahrenstechnische Systeme, Elektro- und Leittechnik, Komponenten und zugehörige Versorgungssysteme verstanden. Diese lüftungstechnisch und durch Betonwände erreichte konsequente räumliche Trennung schliesst Mehrfachausfälle durch Brand, Überflutung, aber auch Sabotage aus.

## Auslegung gegen Kernschmelzunfälle

Das Ereignis eines Kernschmelzunfalls (oft auch als schwerer Störfall bezeichnet) ist ein Szenarium, bei dem unterstellt wird, dass alle Notkühlsysteme kurz- und langfristig ausfallen, was

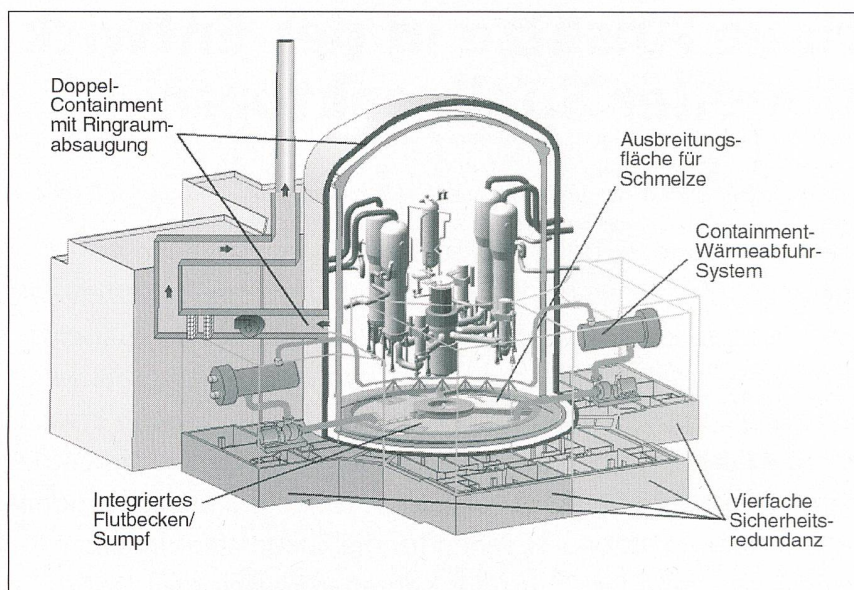


Bild 2 Wesentliche Sicherheitsmerkmale

schliesslich zum Versagen des Reaktor-druckbehälters führt. Eine speziell entwickelte Druckentlastung baut den Druck im Primärkreis auf  $<20$  bar ab und sorgt gleichzeitig für die Inertisierung der Containment-Atmosphäre. Die speziell ausgebildete Reaktorgrube sammelt die Schmelzflüssigkeit auf, bevor sie sich auf eine etwa  $170 \text{ m}^2$  grosse ebene Fläche am Boden des Containments ausbreitet. Die kurze Verweildauer der Schmelze in der Reaktorgrube wird genutzt, um ihre Temperatur durch Vermischen mit Opfermaterial beim Abschmelzen der Grubenwänden abzusenken. Während der Ausbreitung verhindern keramische Schutzschichten ein ungewolltes Vordringen der Schmelze in den Bodenbereich, bevor eine passive Flutung der Schmelze die Kühlung einleitet, die dann von den Containment-Kühlsystemen übernommen und fortgesetzt wird. Das Contain-

ment-Kühlsystem kann seine Funktion sowohl aktiv als auch während langer Karenzzeiten passiv erfüllen.

Während des Schmelzvorganges und der Ausbreitung der Schmelze werden grosse Mengen von Wasserstoff freigesetzt. 40 katalytische Rekombinatoren vermeiden eine globale Konzentration über 10%. Örtlich begrenzte Verbrennungsdrücke und Temperaturen werden somit auf Werte reduziert, die eine Beschädigung des Containments und des Liners sicher vermeiden und auch die integrale Leckrate von  $<1$  Volumen%/Tag während dieser extremen Beanspruchungen gewährleistet.

## Einsatz probabilistischer Bewertungsmethoden zur Konzeptfindung

Zur Auswahl von Anlagen und Systemvarianten während der Planungsphasen wurden verschiedene projektbeglei-

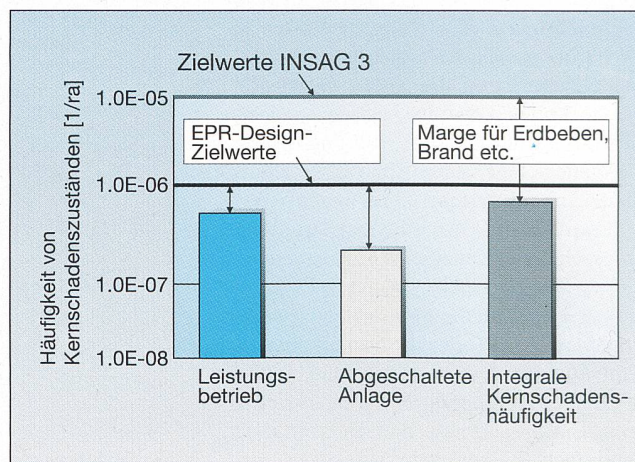


Bild 3 Bewertung der Kernschadenshäufigkeiten

tende probabilistische Bewertungen durchgeführt. Eine systematische Diversifizierung der Sicherheitssysteme war die Folge, die unter Einhaltung vorgegebener Kernschadenshäufigkeiten zu einer ausgewogenen Auslegung der Systeme und Anlagen geführt hat und dominierende Sequenzen aus Leistungs- und Abschaltzuständen vermied. Da für den EPR noch kein Standort festgelegt ist, wurde der Zielwert für die Kernschmelzwahrscheinlichkeit für den Leistungs- und Abschaltzustand mit  $< 10^{-6}$ /Reaktorjahr festgelegt. Damit sind ausreichende Margen zum globalen Zielwert von INSAG 3 (International Nuclear Safety Advisory Group der IAEA) vorhanden, der dort mit  $< 10^{-5}$ /Reaktorjahr festgelegt ist. Das Gesamtergebnis der bisherigen Probabilistischen Sicherheitsanalyse (Level-1-Studie) ist in Bild 3 dargestellt.

### SWR 1000

Das SWR-1000-Entwicklungsvorhaben wird von mehreren europäischen Partnern unterstützt. So sind TVO und VTT aus Finnland, EDF aus Frankreich und NRG aus den Niederlanden mit Ingenieurleistungen und das Paul-Scherrer-Institut aus der Schweiz sowie das Forschungszentrum Jülich aus Deutschland mit experimentellen Aufgaben beteiligt.

#### Passive Sicherheitseinrichtungen als Merkmal des SWR 1000

Als wesentliches neues Merkmal des SWR 1000 wurden passiv wirkende Sicherheitseinrichtungen entwickelt, getestet und in die Planung eingeführt. Der SWR 1000 zeichnet sich durch sehr lange Karenzzeiten bei Störfällen und grosse Auslegungsreserven aus. Unter passiv wirkend versteht man in erster Linie Einrichtungen, die durch naturgesetzliche Eigenschaften ihre Wirkung entfalten, ohne dass äussere Energiequellen oder leittechnische Ansteuerungen notwendig sind. Diese passiven Sicherheitseinrichtungen ersetzen oder ergänzen teilweise aktive Systeme und stellen die Grundlage für Anlagenvereinfachungen dar. In Bild 4 ist ein Schnitt durch den Sicherheitsbehälter mit passiven Sicherheitseinrichtungen dargestellt.

Die Notkondensatoren wirken als vollkommen passive Nachwärmeabfuhrsysteme aus dem Reaktordruckbehälter und werden nur durch dessen Füllstandsabfall aktiviert. Sie ersetzen die Hochdruckeinspeisesysteme und wirken teilweise auch als diversitäre Druckentlastungseinrichtungen zu den Sicherheits- und Entlastungsventilen. Die Notkondensatoren wurden im NOKO-Versuchsstand des Forschungszentrums

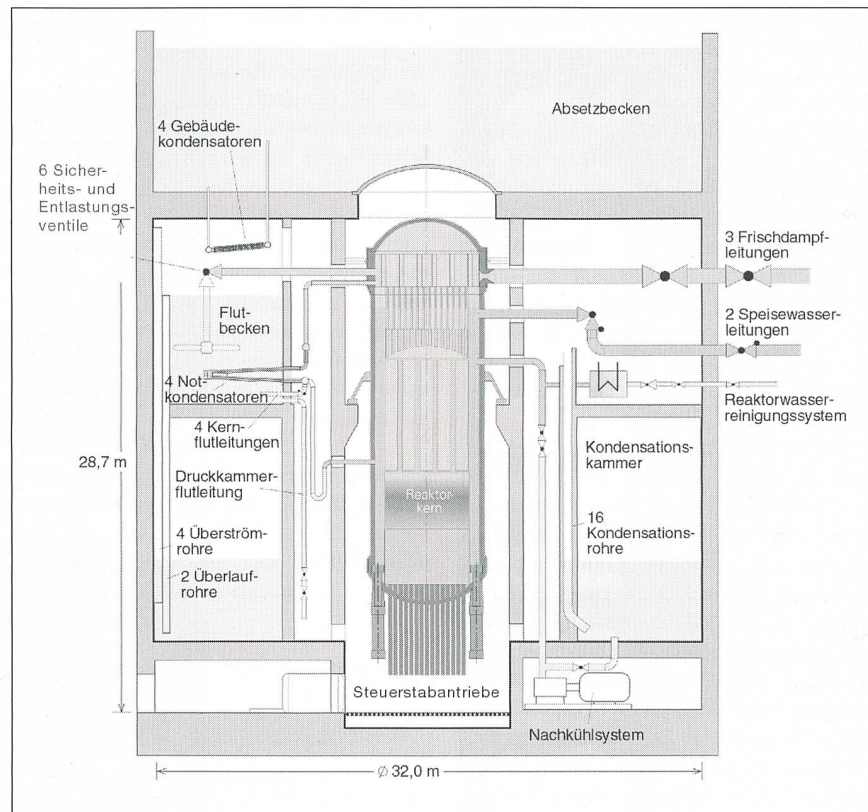


Bild 4 Sicherheitsbehälter mit Einrichtungen

Jülich im Grossmassstab erfolgreich getestet und können somit bezüglich ihrer Funktion und Kapazität als abgesichert gelten.

Die Gebäudekondensatoren haben die Aufgabe, Nachwärme bei ausgefallenen

aktiven Nachwärmeabfuhrsystemen vollkommen passiv aus dem Containment abzuführen. Sie werden durch steigende Temperaturen im Containment bei ansteigendem Dampfpartialdruck aktiviert. Auch die Funktion dieser neuen Kom-

|                               | SWR 100                       | konventioneller SWR mit 1000 MW |
|-------------------------------|-------------------------------|---------------------------------|
| Notkondensator                | 4                             | –                               |
| Hochdruck-Einspeisesystem     | –                             | 3×100%                          |
| Lagerbeckenkühlsystem         | Kühler im LB eingehängt       | 3×100%                          |
| Niederdruck-Einspeisesystem   | 2×100%                        | 3×100%                          |
| Reaktorwasserreinigungssystem |                               | 2×100%                          |
| HKP-Sperrwassersystem         | 2×100%                        | 3×100%                          |
| Steuerstabspülwassersystem    | kombiniertes System           | 2×100%                          |
| Bor-Einspeisesystem           |                               | 2×100%                          |
| Turbine                       | 3000 U/Min                    | 1500 U/Min                      |
| Frischdampfleitungen          | 3                             | 4                               |
| Speisewasserleitungen         | 2                             | 4                               |
| Speisewasser-Vorwärmstrecke   | 1 Strang                      | 2 Stränge                       |
| Reaktorgebäude                | 109 000 m <sup>3</sup>        | 145 000 m <sup>3</sup>          |
| Maschinenhaus                 | 157 000 m <sup>3</sup>        | 238 000 m <sup>3</sup>          |
| Hilfsanlagegebäude            | 40 000 m <sup>3</sup>         | 70 000 m <sup>3</sup>           |
| Schaltanlagegebäude           | 20 000 m <sup>3</sup>         | 65 000 m <sup>3</sup>           |
| Elektro- und Leittechnik      | 2 Stränge (+ passive Systeme) | 3 Stränge                       |

Tabelle I Beispiele für die Kostenreduktion

ponente wurde im Grossmassstab im Panda-Versuchsstand des Paul-Scherrer-Instituts mit positiven Ergebnissen nachgewiesen.

Die durch Rückschlagventile abgesperrten passiven Flutleitungen von den Flutbecken zum Reaktordruckbehälter (RDB) haben die Aufgabe, bei Kühlmittelverluststörfällen und abgesenktem RDB-Druck den RDB passiv zu fluten. Die Rückschlagventile öffnen bei sehr niedrigem RDB-Druck federunterstützt. Die passive Flutung ist ein Ersatz für die aktiven Einspeisesysteme zur Kernkühlung.

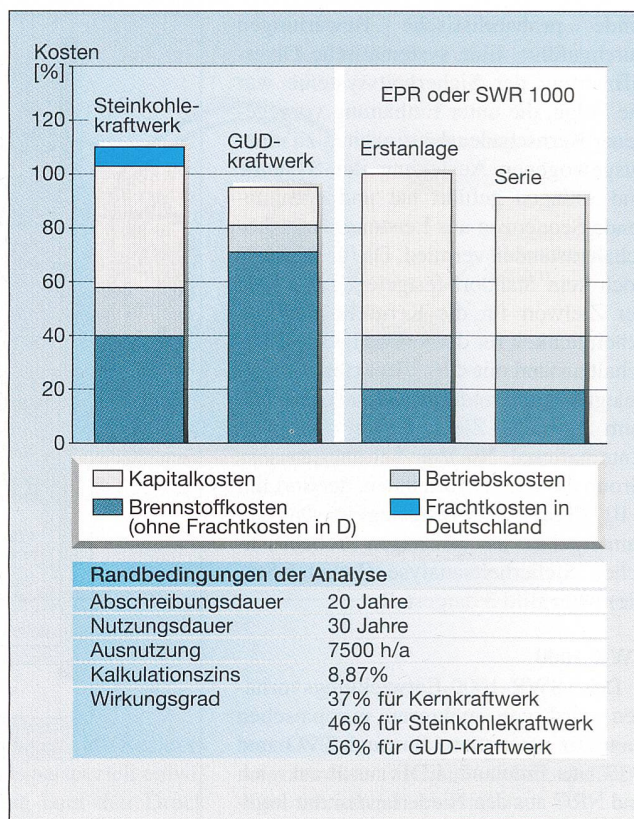
Der SWR 1000 nutzt neben den bekannten und bewährten leittechnischen Auslösemechanismen für sicherheitsgerichtete Massnahmen zur Störfallbeherrschung auch neue, vollkommen passiv wirkende Einrichtungen zur Auslösung von z.B. Schnellabschaltung, RDB-Druckentlastung und Durchdringungsabschluss von eigenmediumbetätigten Armaturen und Armaturen mit gespeicherter Betätigungsenergie. Die dafür vorgesehenen passiven Impulsgeber setzen den abfallenden RDB-Füllstand durch Aufheizen eines Sekundärmediums in einen Druckimpuls um, der zur Betätigung von Kolbenvorsteuerventilen dient. Diese wirken vollkommen unabhängig von den Einrichtungen der Sicherheitsleittechnik und sind deshalb diversitär zu diesen. Die systemtechnische Einbindung in der Anlage ist so geplant (2x2-von-2-Schaltung), dass das fehlerhafte Ansprechen eines Impulsgebers noch nicht zu einer Auslösung der Massnahmen führt, dass aber auch ein Ausfall eines Impulsgebers die Auslösung nicht verhindern kann.

Als neue Einrichtungen wurden die passiven Impulsgeber im Prüfstand des Forschungszentrums Jülich auf ihre Funktionsfähigkeit getestet. Bei einer der getesteten Bauformen wurde der Ansprechdruck von 6 bar bereits nach <10 s erreicht. Die Funktionsfähigkeit dieses Bauteils ist somit zufrieden stellend nachgewiesen. Der passive Impulsgeber ist eine diversitäre Einrichtung zu dem auf digitaler Sicherheitstechnik beruhenden Reaktorschutz.

## Containmentflutung bei Kernschmelzunfällen

Der Ausgleichsfüllstand zwischen den Flutbecken und dem Zentralraum um den Reaktordruckbehälter liegt weit oberhalb der Oberkante des Reaktorkerns. Damit kann eine Kernschmelze im RDB durch Aussenkühlung auf niedrige Temperaturen gebracht werden, so dass ein Durchschmelzen des RDB-Bodens vermieden

Bild 5 Kostenanalyse



wird. Die bei der Aussenkühlung entstehende Dampfmenge wird von den Gebäudekondensatoren niedergeschlagen und so die Energie passiv nach aussen abgeführt.

## Beherrschung von Anlagenstörungen

Aus den vorangegangenen Darstellungen wird ersichtlich, dass zur Störfallbeherrschung sowohl aktive als auch passive Systeme herangezogen werden. Die Redundanzausstattung der Systeme ist derart, dass Instandhaltungsarbeiten an separierbaren und zugänglichen Systemen während des Betriebes möglich sind.

Es wurde nachgewiesen, dass bei Störfällen mit oder ohne Kühlmittelverlust die passiven Sicherheitseinrichtungen alleine in der Lage sind, die Störfälle zu beherrschen, wobei der Reaktorkern stets mit Wasser bedeckt bleibt, so dass keine störfallbedingten Brennelementschäden anzunehmen sind. Die verbliebenen (deutlich reduzierten) aktiven Systeme dienen mehr der Störfallverhinderung und -begrenzung, werden aber auch zusätzlich zur Störfallbeherrschung eingesetzt, was zu niedrigeren Kernschadenshäufigkeiten führt.

Mit den diversitären Einrichtungen (elektromotorisches Einfahren der Steuerstäbe, Abschalten der Umwälz-

pumpen, Boreinspeisung) wird auch der Ausfall der Schnellabschaltung bei einer Transiente (ATWS) beherrscht.

Im Sinne einer probabilistischen Betrachtung wirken alle Systeme, die in der Lage sind, Störfälle zu beherrschen. Durch Redundanz und Diversität der passiven und der aktiven Sicherheitssysteme wird die beim EPR erreichte Eintrittshäufigkeit für eine Kerngefährdung von <10<sup>-6</sup>/a während des Betriebes und bei Anlagenstillständen beim SWR 1000 um mehr als eine Grössenordnung unterschritten. Ausserdem werden Kernschmelzunfälle durch rechtzeitige Aussenflutung des RDB beherrscht. Das Containment ist mit N<sub>2</sub> inertisiert und für eine maximale H<sub>2</sub>-Freisetzung aus einer 100%igen Zirkon-Oxidation ausgelegt.

## Wirtschaftlichkeit

Durch die konsequente Ausnutzung des hohen Leistungspotentials der bereits betriebsbewährten Komponenten des Primärkreislaufes, eine vereinfachte Systemtechnik und ein verbessertes Anlagenlayout konnten beim EPR die spezifischen Investitionskosten trotz den sicherheitstechnischen Verbesserungen erheblich gesenkt werden. Damit liegen

die Stromerzeugungskosten etwa 10% niedriger als die aus Kohleanlagen und etwa vergleichbar mit denen von neueren Gas- und Dampfturbinenanlagen (GUD).

Beim SWR 1000 erlauben u.a. die in Tabelle I aufgeführten Systemvereinfachungen und der 3000-tourige Turbosatz die Bauwerke wesentlich zu verkleinern.

Alles zusammen ergibt im Vergleich zu einer gleich grossen herkömmlichen Anlage einen um 30% reduzierten Investitionsbedarf. Damit verringert sich auch der Instandhaltungsaufwand entsprechend. Verbunden mit einer kurzen Bauzeit von nur 48 Monaten ergeben sich Stromerzeugungskosten, die vergleichbar sind mit jenen von GUD-Anlagen und dem EPR mit deutlich grösserer Leistung. Bild 5 zeigt die entsprechende Kostenanalyse.

### Ausblick

Ende 1999 wurde die grundlegende Entwicklung (Basic Design) für den SWR 1000 mit einem Sicherheitsbericht abgeschlossen. Begleitend wurden alle neuen Systeme und Komponenten in Grossversuchseinrichtungen bezüglich ihrer Funktion und Kapazität unter realistischen und konservativen Bedingungen mit Erfolg getestet. Zusammen mit den noch laufenden vertiefenden Auslegungsschritten und der experimentellen Absicherung der RDB-Aussenkühlung wird die Angebotsreife dieses Projektes im Jahr 2001 erreicht.

Das Basic Design ist auch für den EPR abgeschlossen. Von den Gutachtern beider beteiligter Länder liegen positive Stellungnahmen vor. Die Angebotsreife des EPR-Projekts ist erreicht.

## Nouvelles approches dans le développement des réacteurs conventionnels à fission nucléaire

Malgré la politique actuelle d'abandon de l'énergie nucléaire en Allemagne, le développement du réacteur à eau bouillante B.W.R./SWR 1000 est poursuivi comme concept innovant ainsi que celui du Réacteur Européen à eau sous pression EPR avec son approche moderne, afin d'être prêts pour l'avenir lorsque de l'énergie de remplacement sera nécessaire après la fin de vie des réacteurs actuels. Tous les pronostics fondés sur des réflexions rationnelles considèrent un mix énergétique, englobant l'énergie nucléaire, comme unique possibilité réaliste de mettre à disposition suffisamment d'énergie électrique sûre, propice à l'environnement et économique. Le «Basic Design» est achevé pour les deux concepts.

**SUHNER®**  
Quick Assembly



**Die einfachste Art  
LWL-Verbinder zu  
konfektionieren!**

[www.hubersuhner.com](http://www.hubersuhner.com)