

Beschreibung des Störfalls

Dampferzeuger-Heizrohrleck (DEHL) mit Zusatzstörung

24. März 2014

Einleitung

Die Schilderung eines Dampferzeuger-Heizrohrlecks mit Zusatzstörung in dem Roman „Der Störfall“ /1/ in Verbindung mit Ereignissen der Nuklearkatastrophe von Fukushima hat zu Diskussionen und zu technisch-wissenschaftlichen Untersuchungen zur Beherrschbarkeit dieses Störfalles in Druckwasserreaktoren geführt /2, 3/.

Risiko

Die Eintrittswahrscheinlichkeit von Dampferzeuger-Heizrohrlecks (DEHL) ist aufgrund der sehr großen Anzahl von ca. 16.000 Heizrohren pro Reaktor, der enorm hohen Beanspruchungen und der bereits bestehenden und weiter fortschreitenden Wanddickenschwächungen /4, 5/ um ein Vielfaches höher als andere Störfallursachen. Dies gilt nicht nur für die deutschen sondern vielmehr für alle weltweit betriebenen Druckwasserreaktoren.

Bei weiteren geringen Zusatzstörungen oder anderen Nebenbedingungen, wie sie im Normalbetrieb eines Kraftwerks immer bestehen können, kann der Reaktor im Laufe des Störfallablaufes erneut überkritisch werden. Bei dem derzeitigen Stand der Untersuchungen kann nicht ausgeschlossen werden, dass sich der Störfall zu einem unkontrollierbaren Unfall mit katastrophalen Auswirkungen entwickelt. Risiko ist die Multiplikation von Eintrittswahrscheinlichkeit mit den möglichen Auswirkungen. Da sowohl die Eintrittswahrscheinlichkeit als auch die möglichen Auswirkungen sehr groß sind, ist das Risiko dieses Störfalles besonders hoch.

Stand der Untersuchungen

Bisherige Untersuchungen haben gezeigt, dass bei diesem Störfall Kühlmittel mit einer Borkonzentration von weniger als 100 ppm in den Kern eindringt /2/, wobei ein Reaktor bereits ab einer Borkonzentration von 600 ppm auch bei eingefahrenen Steuerstäben wieder kritisch wird /6/. Da die von der RSK geforderten Werte von mindestens 850 ppm /6/ nicht erreicht werden, wird das erste Schutzziel der Reaktorsicherheitskommission (RSK) „Kontrolle der Reaktivität“ /7/ weit verfehlt. Weiterhin hat sich ergeben, dass ein bisher unbekannter Verlauf eintritt /2/, und dass bei dem derzeitigen Stand der Untersuchungen nicht mehr angenommen werden kann, dass ein DEHL sicher beherrscht werden kann /3/. Auch kann nicht ausgeschlossen werden, dass die beschriebenen Abläufe zum Verbiegen und zu einer massiven Zerstörung von Brennstäben mit Freisetzung von Brennstoff im Reaktordruckbehälter und zu einem unkontrollierten Unfallablauf führen /8 /.

Unbekannter Verlauf

Dieser Störfallverlauf ist bisher weder in den Betriebshandbüchern der Kernkraftwerke beschrieben noch mit dem Betriebspersonal geschult oder trainiert worden, und er ist auch den Kernkraftwerks-Krisenstäben nicht bekannt. Von Seiten der Internationalen Atomenergiebehörde IAEA liegen ebenfalls keine diesbezüglichen Informationen vor.

Vereinfacht dargestellter, ordnungsgemäßer Ablauf bei einem DEHL

Im Folgenden wird der technische Störfallablauf bei einem DEHL stark verkürzt dargestellt, wobei keineswegs ein Anspruch auf Vollständigkeit erhoben wird, zumal die Kraftwerke unterschiedliche technische Ausrüstungen besitzen und auch Handmaßnahmen des Betriebspersonals zu verschiedenen Zeiten angenommen werden müssen. Die angegebenen Werte sind Circa-Werte und können sich in unterschiedlichen Anlagen leicht unterscheiden.

1. Leckage eines Heizrohres (bzw. Mehrfachöffnungen)

- Überströmen von radioaktivem Kühlmittel vom Reaktorkühlkreislauf mit 155 bar auf den Sekundärkreislauf mit 56 bar
- Ansprechen der sekundärseitigen Aktivitätsmessungen, wodurch die automatischen Maßnahmen ausgelöst werden

2. Automatische Maßnahmen

Um den unvermeidlichen Radioaktivitätsaustritt zu minimieren, wird die Anlage automatisch abgeschaltet und die Drücke zwischen Primär- und Sekundärseite werden aneinander angeglichen.

- Leistungsreduktion und Reaktorschnellabschaltung (RESA)
- Turbinenschnellabschaltung (TUSA)
- die Frischdampf-Umleitstation öffnet und führt die im Reaktor weiter anfallende Nachzerfallswärme über die Dampferzeuger an den Kühlturm oder den Fluss ab
- Aufgrund der Anlagenkennlinie steigt der Sekundärdruck vom Vollast-Druck 56 bar auf den Nullast-Druck von 72 bar, der durch den Sollwert der Frischdampf-Umleitstation bestimmt wird
- die Druckhalterheizung wird ausgeschaltet
- die Sprüharmatur(en) öffnen und der Primärdruck wird von 155 bar auf 80 bar abgesenkt, indem der Dampf im Druckhalter abgesprüht wird

3. Stationärer Anlagenzustand

Durch die ersten automatischen Maßnahmen wird ein stationärer Anlagenzustand erreicht, bei dem Primär- und Sekundärdrücke möglichst nahe angeglichen sind und die Aktivitätsfreisetzung reduziert ist.

- die Druckdifferenz zwischen Primär- und Sekundärseite beträgt noch 8 bar
- die dem Sekundärdruck entsprechende Satttdampftemperatur beträgt 288 °C
- die Primärtemperatur wird durch die unmittelbar nach der Abschaltung noch sehr hohe Nachzerfallsleistung und die Wärmeübertragungsfläche der Heizrohre bestimmt und beträgt ca. 290 °C. Der zugehörige Satttdampfdruck liegt bei 75 bar.
- die Siedetemperatur der Primärseite beträgt 295 °C korrelierend mit 80 bar
- Somit beträgt der Siedeabstand für die Hauptkühlmittelpumpen lediglich 5 bar bzw. 5°C, wodurch eine erhebliche Gefahr von Kavitation der Hauptkühlmittelpumpen besteht

4. Absperren des defekten Dampferzeugers

- Um weiteren Aktivitätsaustritt zu verhindern, wird der defekte Dampferzeuger sekundärseitig isoliert, indem Armaturen manuell geschlossen werden. Systemtechnisch zählt dieser Dampferzeuger dann nicht mehr zum Sekundärkreis, von dem er abgetrennt ist, sondern zum Primärkreis, mit dem er über das Leck hydraulisch verbunden ist.

5. Abfahren

Um weiteren Übertritt des radioaktiven Kühlmittels zu reduzieren und um das defekte Heizrohr reparieren zu können, muss die Anlage abgefahren werden. Die Drücke und Temperaturen auf der Primär- und Sekundärseite müssen so weit abgesenkt werden, dass der defekte Dampferzeuger geöffnet und repariert werden kann.

- Über die Frischdampf-Umleitstation wird der Sekundärdruck gemäß einer Abfahrkennlinie abgesenkt. Da hier aus technischen Gründen Satttdampfzustand herrscht, werden auch Sekundär- und Primärtemperaturen korrelierend abgesenkt.

- Der Primärdruck wird mit einem vorgegebenen Abstand dem Sekundärdruck nachgeführt mit dem Ziel, bei annähernd Umgebungsdrücken und -Temperaturen die weitere Nachwärmeabfuhr durch die primärseitigen Nachkühlsysteme zu übernehmen und den defekten Dampferzeuger reparieren zu können
- Da der defekte Dampferzeuger sekundärseitig abgesperrt ist, nimmt er nicht mehr direkt am Abkühlvorgang der Frischdampf-Umleitstation teil. Dementsprechend sinken hier Temperatur und Druck stark verzögert ab und Deionat strömt über das Leck in den Reaktorkühlkreislauf, wo es durch die laufenden Hauptkühlmittelpumpen mit dem borhaltigen Primärkühlmittel vermischt wird und somit unschädlich bleibt.

6. Endzustand

Die Nachkühlsysteme übernehmen die Nachwärmeabfuhr und das Leck kann im abgekühlten und drucklosen Zustand repariert werden.

Mögliche Zusatzstörungen

Bei dem komplexen Vorgang des Druckangleichens kann nicht ausgeschlossen werden, dass sich die Primär- und Sekundärdrücke, aus welchen Gründen auch immer, unzulässig annähern. Ein weitgehendes Angleichen der Drücke ist gewollt und auch notwendig, um das Austreten von radioaktivem Kühlmittel durch das defekte Heizrohr auf die Sekundärseite und damit unvermeidlich an die Umwelt zu minimieren.

Durch dieses Angleichen der Drücke wird aufgrund thermodynamischer Gesetze der Siedeabstand im Primärkreis stark herabgesetzt. Damit entsteht die Gefahr, dass die Hauptkühlmittelpumpen in Kavitation laufen und durch Schutzauslösungen automatisch abgeschaltet werden. Durch die dann fehlende Zwangsumwälzung wird das Deionat (deionisiertes Wasser), das während des Störfallablaufs durch das beschädigte Heizrohr vom Sekundärkreis in den Primärkreis strömt, nicht mehr ausreichend mit boriertem Kühlmittel durchmischt. Es kann sich im unteren Bereich der Hauptkühlmittelleitung ansammeln und als nahezu geschlossener Pfropfen in den Reaktorkern eindringen. Dort wirkt es als Moderator für die Kettenreaktion und steigert die Reaktivität, so dass bei bereits eingefallenen Steuerstäben eine unkontrollierbare Rekritikalität ausgelöst werden kann.

Da sich das Deionat konzentriert in einem der vier Loops angesammelt hat, und hauptsächlich in einen Quadranten des Kerns eintritt, kann nicht ausgeschlossen werden, dass es zu einer starken asymmetrischen Leistungsexkursion oder sogar -Explosion kommt. Dadurch können starke Querkräfte auf die Brennstäbe einwirken, für die sie nicht ausgelegt sind. Dadurch kann die Kerngeometrie beschädigt und die Nachkühlfähigkeit behindert werden. Nach dem derzeitigen Stand der Untersuchungen kann nicht ausgeschlossen werden, dass der postulierte Störfall im Extremfall zum Kernschmelzen oder gar zu einer nuklearen Explosion führen kann.

Eintrittswahrscheinlichkeit der Zusatzstörungen

Um die Aktivitätsfreisetzung möglichst gering zu halten, werden die Drücke von Reaktorkühlkreislauf und Sekundärkreislauf automatisch so weit wie zulässig angeglichen. Damit dies sicher gelingt, müssen eine Vielzahl von Messungen korrekt sein, Automaten und Armaturen präzise funktionieren und Handeingriffe des Betriebspersonals ordnungsgemäß erfolgen. Durch eine Vielzahl möglicher Ursachen kann es bei diesem komplexen Vorgang zum Ausfallen der Hauptkühlmittelpumpen kommen, zumal diese Maßnahmen nicht konsequent gemäß einem Ernstfall geprüft werden können.

Mehrere Ursachen sind in den komplexen Kernkraftwerken während des komplizierten Vorgangs der Druckangleichung denkbar, die zu einer zu starken Annäherung von Primär- und Sekundärdrücken und somit zum automatischen Abschalten der Hauptkühlmittelpumpen führen können, z. B:

- driftende, bzw. abweichende Druckmessungen der Primärseite, evtl. auch beeinflusst durch die Transiente beim Abschaltvorgang
- verzögertes Schließen der Sprüharmaturen
- zu hohe Toleranzen bei der Einstellung der Sollwerte der Absprühautomaten

- Undichtigkeiten der Absprüharmaturen, z. B. wenn sich Korrosionsprodukte in der Sprühleitung, die dieser extremen Belastung im Ernstfall erstmalig ausgesetzt ist, lösen und auf die Dichtflächen der Armaturen setzen
- Schwergängigkeit oder Klemmen der fast nie benutzten Absprüharmatur(en), die zu einem Ansprechen der Drehmomentauslösung und somit zum Schalterfall und Hängenbleiben der Armatur führt
- ungenaues Nachführen oder auch Überschwingen des Primärdruckes durch manuelle Maßnahmen des Betriebspersonals
- ungenaue Druckmessungen der Sekundärseite
- Überschwingen der nicht sicherheitstechnisch ausgelegten Frischdampf-Umleitstation während des schnellen Öffnungsvorgangs oder auch während des Abfahrens der Anlage gemäß Kennlinie
- ungenau eingestellte Abfahrkennlinie der Frischdampf-Umleitstation
- ganz allgemein ungenaue oder fehlerhafte Handmaßnahmen des Betriebspersonals auf der Primär- oder Sekundärseite

Diese Aufzählung erhebt keineswegs einen Anspruch auf Vollständigkeit der möglichen Zusatzstörungen. Sowohl viele automatische Maßnahmen von technischen Einrichtungen, die zum Teil nicht sicherheitstechnisch ausgelegt sind, als auch präzise Handeingriffe des Betriebspersonals sind für eine sichere Beherrschung erforderlich. Aus technischen und wirtschaftlichen Gründen können diese vielen Maßnahmen nicht konsequent gemäß einem Ernstfall geprüft werden. Somit muss die Eintrittswahrscheinlichkeit einer Zusatzstörung mit Ausfall der Hauptkühlmittelpumpen als relativ hoch angesehen werden.

Ausfall der Hauptkühlmittelpumpen

Die Hauptkühlmittelpumpen sind ausgelegt für die Zustände 155 bar und etwa 290° Celsius (Sättigungsdruck 75 bar) und haben somit im Normalbetrieb einen sicheren Abstand von etwa 70 bar zur Dampfbildung, wodurch Kavitation sicher vermieden wird.

Beim Dampferzeuger-Heizrohleck sinkt dieser Abstand bis auf 5 bar mit dem erheblichen Risiko von noch geringeren Werten bei Schwankungen, Messtoleranzen oder mehrfach möglichen anderen Bedingungen. Dabei besteht ein hohes Risiko, dass sich an den Schaufeleintritten, wo das Kühlmittel stark beschleunigt wird, Dampfblasen bilden, die dann in der Pumpe bei dem höheren Druck schlagartig zusammenbrechen, wodurch Kavitation entsteht. Dieser Effekt kann zur Beschädigung der Pumpen führen. Ein sicherer Betrieb der Pumpen ist bei diesen Zuständen nicht mehr gegeben, zumal diese Betriebsweise nicht unter realistischen DEHL-Bedingungen hinreichend getestet werden kann, da eine Beschädigung der Pumpen und insbesondere der Hochdruckdichtungen extrem teuer wäre.

Besonders empfindlich sind die technisch hochentwickelten Hochdruckdichtungen, die an der sich drehenden Welle der Pumpe den enormen Druck von 155 bar auf Umgebungsdruck von 1 bar abbauen und dabei ein Austreten des radioaktiven Kühlmittels verhindern müssen. Deshalb sind besonders diese Dichtungen sehr gefährdet und werden durch die Pumpenschutzautomaten überwacht. Bei geringsten Abweichungen werden deshalb die Pumpen automatisch durch Schutzauslösung abgeschaltet und können auch nicht sofort wieder eingeschaltet werden.

Ablauf mit Zusatzstörung

Bei Ausfall der Hauptkühlmittelpumpen sind mehrere Varianten des weiteren Verlaufs in Abhängigkeit von Ursachen, Zeitabläufen, Handeingriffen usw. möglich. Im Folgenden wird ein Ablauf beispielhaft skizziert.

- zu starke Annäherung des Primärdruckes an den Siedezustand
- Kavitation, Durchsatz- und Druckschwankungen an den HD-Dichtungen
- Schutzabschaltung der Hauptkühlmittelpumpen
- Nachwärmeabfuhr über Naturumlauf in den drei intakten Loops
- manuelles Absperrn des defekten Dampferzeugers

- manuelles Einleiten des Abkühlvorganges und der Druckabsenkung parallel von Primär- und Sekundärseite mit den drei intakten Dampferzeuger und der FD-Umleitstation
- Rückströmung von Deionat aus dem abgesperrten Dampferzeuger, der nicht direkt am Abkühlvorgang teilnimmt, in den Reaktorkühlkreislauf
- unter bestimmten Bedingungen, wie sie in einer der Untersuchungen errechnet wurden, kommt es zu einer bisher unbekanntem Auswirkungen (dies trifft auch in dem bestehenden Betriebshandbuch mit Notstromfall zu):
 - Ausdampfen in den Heizrohren des defekten, nicht direkt abgekühlten Dampferzeuges
 - später wieder Zusammenbrechen des Dampfes in den Heizrohren
 - Absinken des Druckhalter-Füllstandes unter Grenzwert
 - Anregung der Notkühlsignals
 - Signalisierung „Mittleres Leck im Reaktorkühlkreislauf“
 - zusätzliche Verwirrung mit nicht vorhersehbaren Reaktionen des Betriebspersonals, da diese gravierende Zustandsänderung auch in dem bestehenden Betriebshandbuch mit Notstromfall nicht enthalten ist
- Ansammlung des nicht aufborierten Deionats in der Pumpenschleife des abgesperrten Loops
- Eindringen des minderborierten Deionatpfropfens in den Kern
- partielle unkontrollierbare Überkritikalität trotz eingefallener Abschaltstäbe
- Unbekannte mögliche Auswirkungen:
Leistungsexkursion oder sogar Explosion, Dampfblasenbildung, schlagartige Druckerhöhung mit unbekanntem Folgeschäden, starke Querkräfte auf die Brennstäbe, Beschädigung der Kerngeometrie mit unbekanntem Auswirkungen auf die Reaktivität und die Nachkühlfähigkeit, evtl. Kernschmelzen, unkontrollierbare Aktivitätsfreisetzung

Schlussfolgerung und Konsequenzen

Die aufgrund der ersten Untersuchungen bereits vorliegenden neuen Erkenntnisse müssen dringend in die bestehenden Betriebshandbücher einfließen. So muss z. B. die bisher unbekanntem Anregung der Notkühlsignals in die bestehenden Betriebshandbücher „DEHL mit Notstromfall“ aufgenommen werden, weil ansonsten wegen des falsch beschriebenen Anlagenzustands gravierende Fehlhandlungen provoziert werden. Auch müssen verschiedene Varianten analysiert werden, wie z. B. manuelle Eingriffe zu verschiedenen Zeiten und unterschiedliche Leckgrößen, wie auch die von der RSK unterstellten Mehrfachöffnungen von Dampferzeuger-Heizrohren.

Wegen des hohen Risikos dieses postulierten Störfalls sind dringend weitere Untersuchungen sowie die Umsetzung der hieraus resultierenden Konsequenzen dringend notwendig.

I. Notwendige, weiterführende Untersuchungen

1. Abschätzung der Eintrittswahrscheinlichkeit
2. Detaillierte Ermittlung und Darstellung von technischen Abläufen mit Varianten durch unterschiedliche zeitliche Handeingriffe und Leckgrößen einschließlich Mehrfachöffnungen
3. Analyse der thermohydraulischen Auswirkungen
4. Berechnung der physikalischen, nuklearen Auswirkungen auf die Reaktivität und Größe der möglichen Rekritikalität
5. Abschätzung der möglichen Auswirkungen auf die Kerngeometrie, die Nachkühlfähigkeit und zusätzlicher Zerstörungen durch Druckanstieg
6. Zusammenfassung der Ergebnisse mit Schlussfolgerungen und notwendigen Konsequenzen

II. Einfließen in die Praxis

1. Information der Kernkraftwerksbetreiber und weiterer Betroffener
2. Internationale Diskussion über die IAEA und Ergänzen der IAEA-Guidelines

3. Berichtigung der bestehenden Betriebshandbücher einschließlich DEHL mit Notstromfall und ggf. Erstellen zusätzlicher Betriebshandbücher
4. Schulung des Betriebspersonals und Information der Krisenstäbe
5. Nachrüsten der Kernkraftwerkssimulatoren
6. Training des Betriebspersonals an den Simulatoren
7. Technische Nachrüstungen zur Reduzierung der Ursachen und Vermeidung der möglichen Auswirkungen

Quellenverzeichnis

/1/ „Der Störfall“, Roman von Helmut J. L. Mayer, erschienen Nov. 2012 im Persimplex-Verlag

/2/ GRS-Stellungnahme, wissenschaftlich-technische Analyse „Risiko durch Deionatpfropfen beim Dampferzeugerheizrohrleck in einem DWR“ vom 16.09.2013

/3/ Stellungnahme des Instituts für Sicherheits- und Risikowissenschaften an der Universität für Bodenkultur Wien vom 23. 01.2014

/4/ RSK-Stellungnahme (447. Sitzung am 03.05.2012). Zu unterstellende Leckagen an Dampferzeuger(DE)-Heizrohren, Mehrfachrohrbruch/Lecköffnung wanddickengeschwächter DE-Heizrohre

/5/ RSK-Sitzung am 15.07.2010, Anlage zum Ergebnisprotokoll, Stellungnahme: Schäden an Dampferzeuger(DE)-Heizrohren durch Spannungsrisskorrosion – Ursache und Nachweis

/6/ RSK-Stellungnahme (446. Sitzung am 05.04.2012). Empfehlungen zur maximalen zulässigen kritischen Borkonzentration zur Sicherstellung der Unterkritikalität nach „Reflux-Condenser-Betrieb“ beim kleinen Leckstörfall

/7/ RSK-Stellungnahme (460. Sitzung der Reaktor-Sicherheitskommission am 29.08.2013)
4 Sicherheitsgrundsätze für die technische Anlagenauslegung

/8/ Büro für Atomsicherheit, Statement auf der Homepage, 24.02.2014: Dampferzeuger-Heizrohrleck: Ungesteuerte Kettenreaktion in Reaktoren möglich?