

## „Ausfall der Hauptwärmesenke“ trug in Fukushima zu Super-GAU bei

Von Henrik Paulitz, März 2017

Zwölf Kilometer südlich des 2011 havarierten Atomkraftwerks Fukushima Daiichi (Fukushima I) befindet sich das Atomkraftwerk Fukushima Daini (Fukushima II). Auch Fukushima Daini war am 11. März 2011 von Erdbeben und Tsunami massiv betroffen, die Beherrschung des Störfalls verlief hoch-dramatisch. Das Öko-Institut, Gutachter der deutschen Atomaufsicht, verglich in einer Studie die Ereignisabläufe in den beiden Atomkraftwerken und kam zu einem bemerkenswerten Ergebnis: Dass in Fukushima Daini die externe Stromversorgung aufrechterhalten werden konnte und es somit u.a. nicht zum frühzeitigen Ausfall der Hauptwärmesenke gekommen war, wirkte sich „günstig“ auf den Ereignisablauf aus. Demgegenüber kam es in Fukushima Daiichi gleich zu Unfallbeginn in allen drei havarierten Blöcken zum Ausfall der Hauptwärmesenke, was dort offenbar zum katastrophalen Unfallverlauf beitrug. In Deutschland wird seit etlichen Jahren über Siedewasserreaktoren und über die vom ‚Ausfall der Hauptwärmesenke‘ ausgehenden Gefahren diskutiert.

### Vertiefte Ereignisanalyse zur Anlage Fukushima-Daini

In einer „Vertieften Ereignisanalyse zur Anlage Fukushima-Daini“ untersuchte das Öko-Institut im Rahmen eines Forschungsprojekts der deutschen Atomaufsicht „Sicherheits- und Risikofragen im Nachgang zu den nuklearen Stör- und Unfällen in Japan“.<sup>1</sup>

Im Zentrum der Untersuchung steht die Fragestellung: Warum kam es bei vergleichbarer Anlagentechnik und bei vergleichbaren Einwirkungen durch Erdbeben und Tsunami in Fukushima Daiichi (Fukushima I) zum dreifachen Super-GAU, in Fukushima Daini (Fukushima II) hingegen „nur“ zu „schweren Störfällen“ der INES-Stufe 3.

### Beginn des Störfalls in Fukushima Daini (Fukushima II)

Zum Zeitpunkt des Erdbebens befanden sich in Fukushima Daini alle vier Blöcke im ungestörten Leistungsbetrieb. Um 14.48 Uhr wurde wegen des Erdbebens die Leistungserzeugung durch eine automatische Reaktorschnellabschaltung in allen Blöcken unterbrochen. Es kam zu einem kurzzeitigen Füllstandsabfall in den Reaktordruckbehältern aller vier Blöcke.

---

<sup>1</sup> Öko-Institut: Sicherheits- und Risikofragen im Nachgang zu den nuklearen Stör- und Unfällen in Japan - Vertiefte Ereignisanalyse zur Anlage Fukushima-Daini. Von Christoph Pistner und Matthias Englert. Durchgeführt im Auftrag der Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH im Rahmen des Vorhabens UM11R01560 des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB). Darmstadt. 25.02.2015. – Die Skizzierung der Ereignisabläufe in Fukushima Daini in diesem Papier folgt den Darstellungen in dieser Studie des Öko-Instituts.

Von vier externen Anbindungen an das Stromverbundnetz waren vor dem Störfall drei Linien verfügbar; eine war prüfungsbedingt abgeschaltet. Unmittelbar nach dem Erdbeben wurde eine zweite Linie aufgrund von Schäden unterbrochen. Gegen 15.50 Uhr musste eine dritte Linie wegen Schäden abgeschaltet werden, so dass ab diesem Zeitpunkt nur noch eine Linie zur externen Versorgung der Anlage mit Strom zur Verfügung stand.

### Kein frühzeitiger Ausfall der Hauptwärmesenke

In allen vier Blöcken des Standorts Fukushima Daini konnte damit die Eigenbedarfsversorgung (Stromversorgung) über das externe Netz aufrechterhalten werden. Dadurch kam es in Fukushima Daini glücklicherweise nicht zu einem frühzeitigen Ausfall der Hauptwärmesenke.

Nach dem Erdbeben konnte daher bis zum Eintreffen des Tsunami „die Wärme aus dem Reaktor über die Frischdampfleitungen und die Frischdampfumleitstation in den Hauptkondensator abgeführt“ werden. Die Bespeisung des Reaktordruckbehälters zur Füllstandshaltung erfolgte über das Hauptspeisewassersystem.

### Ausfall der Hauptwärmesenke erst nach Tsunami

Ab ca. 15.22 Uhr erreichte der Tsunami den Standort Fukushima Daini.

Aufgrund der tsunamibedingten Schäden sah sich das Schichtpersonal gemäß Betriebsanleitung dann doch gezwungen, durch manuelles Schließen der Frischdampfabschlussventile (MSIV, „Isoventile“) die Reaktordruckbehälter in allen vier Blöcken von ihrer Hauptwärmesenke zu isolieren (15.34 Uhr – 15.37 Uhr).

Durch den zeitlich verzögerten Ausfall der Hauptwärmesenke kam es in allen vier Blöcken zu einem vergleichsweise langsamen Druckanstieg, der den offiziellen Angaben zufolge erst 7 bis 19 Minuten später zum automatischen Öffnen der Druckentlastungsventile führte (15.41 Uhr – 15.55 Uhr).

### Sofortiger Ausfall der Hauptwärmesenke in Fukushima Daiichi

Demgegenüber kam es in Fukushima Daiichi (Fukushima I) infolge des erdbebenbedingten Ausfalls der externen Stromversorgung in allen drei havarierten Blöcken 1, 2 und 3 gleich zu Beginn des Unfalls zum Ausfall der Hauptwärmesenke („MSIV closed“), wie der Fukushima-Betreiber Tepco mit einem im Mai 2011 veröffentlichten Dokument mitteilte.

Das führte zu einem gefährlichen Druckanstieg („the reactor pressure went up“) und zu einem schnellen Füllstandsabfall im Reaktordruckbehälter („the water level went down“):<sup>2</sup>

② MSIV closed  
As MSIV (4 inside the reactor containment vessel, 4 outside) closed, steam was contained in the reactor and the reactor pressure went up.

③ RCIC started up  
As the reactor pressure went up, Safety Relief Valve operated to contain pressure. But because of this, the water level went down. In order to cool the

<sup>2</sup> Tepco: Plant data of Fukushima Daiichi . Dateiname „TEPCO 110516e12.pdf“. Vermutlich vom 16.05.2011. S. 1. – IPPNW: Gefahren von Siedewasserreaktoren. Von Henrik Paulitz und Reinhold Thiel. 2014.

Ebenso ist auch dem Fukushima-Bericht der Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) von 2014 zu entnehmen, dass es in den drei havarierten Blöcken zu Ausfällen der Hauptwärmesenke („Durchdringungsabschluss im Frischdampfsystem“) kam.

Für Fukushima Daiichi, Block 1, skizziert die GRS den Ausfall der Hauptwärmesenke und den dadurch bedingten Druckanstieg vom Normalbetriebsdruck von 70 bar ausgehend wie folgt, ohne Angaben zum Druckmaximum zu machen:<sup>3</sup>

*„Infolge des Ausfalls der externen Stromversorgung starteten die beiden Notstromdiesel auslegungsgemäß. Durch den kurzzeitigen Spannungsabfall auf sicherheitstechnisch wichtigen Stromschienen kam es auslegungsgemäß zu einem Durchdringungsabschluss im Frischdampfsystem. Dabei wurden mehrere Ventile innerhalb und außerhalb des Containments (die sog. Frischdampfabschlussarmaturen) geschlossen und dadurch verhindert, dass der im RDB [Reaktordruckbehälter, Anm. d. Red.] entstehende Frischdampf aus dem Containment gelangt. In der Folge kam es zu einem Druckanstieg im RDB über den Normaldruck von rund 70 bar.“*

Praktisch das gleiche Szenario ereignete sich in den Blöcken 2 und 3:<sup>4</sup>

*„Das Erdbeben verursachte Schäden in der Umgebung, die zu einem Ausfall der externen Stromversorgung führten. Daraufhin starteten beide Notstromdiesel auslegungsgemäß. Durch den kurzzeitigen Spannungsabfall auf sicherheitstechnischen wichtigen Stromschienen kam es auslegungsgemäß zu einem Durchdringungsabschluss des Frischdampfes, das heißt zu einem Schließen der Frischdampf-Isolationsarmaturen. Infolge des Durchdringungsabschlusses stieg der Druck im RDB über den Betriebsdruck von ca. 70 bar an.“*

#### „Relevanter Unterschied“

Das Öko-Institut bewertete in seiner Studie unter anderem die „Auswirkungen des Erdbebens“ auf beide Atomkraftwerke und ermittelte wenige „relevante Unterschiede“. Ein „relevanter Unterschied“, der in Fukushima Daiichi gleich zu Beginn zum katastrophalen Unfallverlauf beitrug war der frühe Ausfall der Hauptwärmesenke.

Demgegenüber erfolgte in Fukushima Daini die Wärmeabfuhr längere Zeit noch über die Hauptwärmesenke, was sich laut Öko-Institut dort „günstig“ auf den Störfallverlauf auswirkte:

*„Hieraus resultieren verschiedene für das Ereignis relevante Unterschiede:*

*- Die Hauptwärmesenke bleibt in Fukushima Daini bis zum Eintreffen des Tsunami erhalten. Damit erfolgt ein Wärmeeintrag in die Kondensationskammer erst zu einem Zeitpunkt, als die Nachzerfallsleistung bereits weiter zurückgegangen ist, was sich günstig auf den Anstieg von Druck und Temperatur im Sicherheitsbehälter nach dem vollständigen Ausfall der Systeme zur Wärmeabfuhr aus der Kondensationskammer auswirkt.“*

Aufgrund des sofortigen Ausfalls der Hauptwärmesenke in Fukushima Daiichi konnte dort also die Nachzerfallswärme aus dem Reaktor gleich zu Unfallbeginn

---

<sup>3</sup> GRS: Fukushima Daiichi. 11. März 2011. 3. überarbeitete Auflage. GRS-S-54. März 2014. S. 12 f.

<sup>4</sup> GRS: Fukushima Daiichi. 11. März 2011. 3. überarbeitete Auflage. GRS-S-54. März 2014. S. 18 u. 22.

nicht mehr an den Hauptkondensator abgeführt werden, was offenbar maßgeblich zu dem katastrophalen Unfallverlauf beitrug.

### IPPNW fordert die Stilllegung von Siedewasserreaktoren

In Deutschland wird seit etlichen Jahren über Siedewasserreaktoren und über die vom Ausfall der Hauptwärmesenke ausgehenden Gefahren diskutiert.

Viel beachtete, gefährliche Störfälle wie 2006 im schwedischen Forsmark oder auch der „Trafobrand“ im inzwischen stillgelegten deutschen Siedewasserreaktor Krümmel 2007 waren mit dem Ausfall der Hauptwärmesenke verbunden.

Der Physiker Reiner Szepan warnt insbesondere vor einem massiven Druckanstieg (Druckstoß), wenn der Ausfall der Hauptwärmesenke mit einer Beeinträchtigung der Reaktorschnellabschaltung bzw. der Sicherheits- und Entlastungsventile verbunden ist.

Der deutschen Risikostudie für Siedewasserreaktoren zufolge geht das größte Risiko für einen Atomunfall im Siedewasserreaktor Gundremmingen vom Ausfall der Hauptwärmesenke aus. Statistisch betrachtet werden 3 von 4 so genannte Gefährdungszustände in Gundremmingen von dieser Art von ‚Auslegungsstörfall‘ ausgelöst.<sup>5</sup>

Unter dem Motto „Wer B sagt, muss auch C sagen“ fordert die deutsche Anti-Atombewegung, dass mit der geplanten Stilllegung des Atomreaktors Gundremmingen B im Jahr 2017 zugleich Gundremmingen C stillgelegt werden muss. Die IPPNW unterstützt diese Forderung wie auch die Stilllegung von Siedewasserreaktoren weltweit.

---

<sup>5</sup> GRS-102: SWR. Sicherheitsanalyse. Abschlussbericht. Teil 1. Gesellschaft für Anlagen und Reaktorsicherheit (GRS). Juni 1993. – GRS: 16. GRS-Fachgespräch. Tagungsbericht. Berlin 28. und 29. Oktober. GRS-97. Januar 1993. S. 66.

## Anhang) Weitere Störfall-Verläufe in Fukushima Daini, Blöcke 1 - 4

Nachfolgend werden die weiteren Störfall-Verläufe in den Blöcken 1 – 4 des Atomkraftwerks Fukushima Daini skizziert, basierend auf der Studie des Öko-Instituts. Die Abläufe zeigen, wie komplex und risikoreich die Beherrschung solcher Störfälle in Siedewasserreaktoren sein kann.

### „Nuklearer Notfall“ wegen Unverfügbarkeit der Kühlsysteme

Erdbeben bzw. Tsunami hatten erhebliche Auswirkungen auf die Nachkühlsysteme RHR<sup>6</sup>. Nur in Block 3 stand immerhin noch die Redundanz B des Nachkühlsystems RHR ununterbrochen zur Verfügung.

In den Blöcken 1, 2 und 4 waren hingegen alle Redundanzen des Nachwärmeabfuhrsystems RHR unverfügbar. Der Betreiber des Atomkraftwerks Fukushima Daini meldete daher gegen 18.45 Uhr gemäß Artikel 10 § 1 des japanischen Kernenergiegesetzes einen „nuklearen Notfall“ (loss of heat removal function).

In Block 1 hatte die Signalisierung zuvor auf ein kleines Leck hingedeutet.

### Weiterer Störfall-Verlauf in Block 1 und 2

Nach dem manuellen Schließen der Frischdampfabschlussventile (MSIV<sup>7</sup>, „Isoventile“) war in den Blöcken 1 und 2 auch die Bespeisung des Reaktordruckbehälters durch das Hauptspeisewassersystem unterbrochen.

In Block 1 war schon gegen 15.37 Uhr ein niedriger Füllstand im Reaktordruckbehälter signalisiert worden. Um ca. 15.36 Uhr wurde in Block 1 das Hochdruck-Nachspeisensystem RCIC von Hand in Betrieb genommen, wodurch der Füllstand im Reaktordruckbehälter „gehalten“ werden konnte. Auch in Block 2 wurde gegen 15.43 Uhr RCIC<sup>8</sup> in Betrieb genommen.

Da in den Blöcken 1 und 2 alle Notstromdiesel unverfügbar waren, stand – offenbar trotz vorhandener externer Stromversorgung des Kraftwerks – das Hochdruck-Kernsprühsystem HPCS<sup>9</sup> als Notkühlsystem nicht zur Verfügung. Unter diesen Bedingungen hätte bei einem Ausfall des nur einsträngigen, dampfgetriebenen Nachspeisensystems RCIC keine weitere Möglichkeit zur Bespeisung des Reaktordruckbehälters im Hochdruckbereich mehr bestanden.

Die Betriebsmannschaft beschloss daher, in beiden Blöcken als Notfallmaßnahme, parallel zum RCIC-Betrieb eine Druckabsenkung in den Druckbereich der Niederdrucksysteme vorzunehmen. Die Druckabsenkung über die Sicherheits- und Entlastungsventile (SRV) führte zu einem gefährlichen Druck- und Temperaturanstieg in der Kondensationskammer S/C, ohne dass die Kondensationskammer gekühlt werden konnte. Damit bestand die Gefahr, dass die Kühl- und Druckabbaufunktion der Kondensationskammer aufgrund hohen Drucks und hoher Temperatur verloren

---

<sup>6</sup> RHR – Residual Heat Removal System. Das Nachwärmeabfuhrsystem dient der Nachwärmeabfuhr im Stillstand und bei Störfällen.

<sup>7</sup> MSIV – Main Steam Isolation Valves. Diese „Isoventile“ schließen bei Störfällen bei Bedarf die Frischdampfleitungen, was zum Ausfall der Hauptwärmesenke führt.

<sup>8</sup> RCIC – Reactor Core Isolation Cooling System. Das lediglich einsträngige Hochdruck-Nachspeisensystem soll beim Ausfall der Hauptwärmesenke (Schließen der MSIV) verdampfendes Kühlmittel aus dem Reaktordruckbehälter ersetzen. Es ist Frischdampf-getrieben und eigentlich nur für den Druckbereich oberhalb von ca. 10 bar konzipiert. Für den Betrieb des Systems ist eine Gleichstromversorgung erforderlich.

<sup>9</sup> HPCS – High Pressure Core Spray System. Das lediglich einsträngige Hochdruck-Kernsprühsystem dient der Kernkühlung u.a. bei Kühlmittelverluststörfällen. Das System steht nur dann zur Verfügung, wenn das Zwischenkühlsystem des HPCS (HPCSC), das Nebenkühlwassersystem des HPCS (HPCSS) und der Notstromdiesel H verfügbar sind.

gehen konnte, bevor der Reaktor in den Niederdruckbereich abgesenkt werden könnte. In dieser heiklen Situation wurde der Krisenstab regelmäßig informiert.

Zusätzlich kam es in der Kondensationskammer noch zu einem Füllstandsanstieg, der gemäß Notfallhandbuch vorsah, dass das Nachspeisesystem RCIC nicht länger aus dem Kondensatvorratsbehälter CST, sondern aus der Kondensationskammer S/C fördert. Eine solche Umschaltung konnte sich bei fehlendem Nachwärmeabfuhrsystems RHR negativ auf die Druckabbaufähigkeit der Kondensationskammer auswirken. Die Umschaltung wurde trotz des enormen Risikos vorgenommen.

### Kritischer Übergang zur Niederdruck-Einspeisung in Block 1

In Block 2 verlief der Übergang zur geplanten Niederdruckeinspeisung vergleichsweise reibungslos, da die elektrische Versorgung der Einrichtungen des Nachkühlsystems RHR offenbar vorhanden war.

In Block 1 war der Übergang von der RCIC-Hochdruck- zur Niederdruckeinspeisung mit dem Zusatzwasser-Kondensatsystem MUWC<sup>10</sup> hingegen äußerst kritisch.

Da Ventile teilweise nicht elektromotorisch von der Warte aus angesteuert werden konnten, musste das Betriebspersonal zunächst im zweiten Stockwerk des Reaktorgebäudes befindliche Armaturen von Hand öffnen.

Nachdem der Reaktordruck auf unter 10 bar abgesenkt worden war, konnte die testweise Einspeisung durch das Zusatzwasser-Kondensatsystem MUWC zunächst nicht bestätigt werden. Diese Bestätigung war erst nach weiterer Druckabsenkung auf unter ca. 6,5 bar möglich.

Diese Druckabsenkung weit unter 10 bar gefährdete wiederum den Betrieb des Hochdruck-Nachspeisesystems RCIC, dessen Antriebsturbine auf einen bestimmten Frischdampfdruck angewiesen ist. Spätestens bei einem Druck unterhalb von 3,4 bar ist keine Hochdruckeinspeisung mehr möglich. Vor diesem Hintergrund verzögerte der Schichtleiter die weitere Druckabsenkung bis zum Erreichen einer Kondensationskammer-Temperatur von 96 °C am 12. März um ca. 3.48 Uhr. Erst dann riskierte die Schichtmannschaft die weitere Druckabsenkung auf ca. 3,3 bar, die bis 4.56 Uhr dauerte.

Glücklicherweise gelang schließlich der kritische Übergang der Einspeisung auf das Zusatzwasser-Kondensatsystem MUWC (Niederdrucksystem), die bis zum 14. März aufrechterhalten wurde.

### Weiterer Störfall-Verlauf in Block 3

Da in Block 3 Strang A des Nachkühlsystems RHR noch zur Verfügung stand, bestand dort die Möglichkeit, den Reaktor durch die Betriebsweise „Stillstandskühlen“ in den Zustand „kalt, unterkritisch“ zu überführen. Als Voraussetzung für diese Betriebsweise musste der Druck im Kühlsystem auch hier in den Niederdruckbereich abgesenkt werden. Die sich dabei aufheizende Kondensationskammer konnte über das verfügbare Nachkühlsystems RHR hinreichend gekühlt werden.

---

<sup>10</sup> MUWC – Make-Up Water Condensate System. Das nicht notstromgesicherte Zusatzwasser-Kondensatsystem wurde erst im Zuge der Einführung von „Notfallmaßnahmen“ zur Beherrschung von Störfällen nachgerüstet. Das System kann über Querverbindung zum RHR nur dann in den Reaktordruckbehälter einspeisen, wenn der Reaktordruck unter ca. 7 bar abgesunken ist. Die Inbetriebnahme des Systems erfolgt teilweise von der Warte aus, zum Teil sind aber Handmaßnahmen vor Ort im Reaktorgebäude erforderlich.

Um 16.06 Uhr musste das Nachspeisesystem RCIC von Hand in Betrieb genommen werden. Wegen des niedrigen Reaktordrucks infolge der Druckabsenkung endete gegen 23.11 Uhr die Einspeisung über das RCIC.

Um 23.15 Uhr konnte das Zusatzwasser-Kondensatsystem MUWC in Betrieb genommen werden. Nach zwischenzeitlich notwendigem Kondensationskammer-Kühlen konnte Block 3 bis 12.15 Uhr am 12. März in den Zustand „kalt, unterkritisch“ überführt werden.

#### Weiterer Störfall-Verlauf in Block 4

Auch in Block 4 erfolgte die Einspeisung zunächst über das Hochdruck-Nachspeisesystems RCIC.

Das Problem bestand in der Unverfügbarkeit der Nachwärmeabfuhr über die beiden Stränge des Nachkühlsystems RHR. Darüber hinaus drohte ein „Station-blackout“ (vollständiger Verlust der Wechselstromversorgung) wegen der Unverfügbarkeit der Notstromdiesel und der instabilen Versorgung über eine externe Leitung (Tomioka 1).

Wie in den Blöcken 1 und 2 bereitete die Schichtmannschaft eine Druckabsenkung und Einspeisung über das Zusatzwasser-Kondensatsystem MUWC vor. Die Kondensationskammer erreichte eine Temperatur von ca. 70 °C. Trotz der Unverfügbarkeit einer Wärmeabfuhr über das Nachkühlsystem RHR entschied die Schichtmannschaft, zum Erhalt der Funktionsfähigkeit des RCIC ab 23.19 Uhr eine Förderung aus dem Kondensatvorratsbehälter CST (und nicht aus der Kondensationskammer) zu wählen.

Gegen 0.16 Uhr am 12. März war der Reaktordruck unter ca. 3,7 bar gefallen, so dass das RCIC automatisch abgeschaltet wurde. Das Personal nahm daraufhin das Zusatzwasser-Kondensatsystem MUWC in Betrieb.

#### Knappe Kühlwasservorräte erschweren Situation in Block 4

Durch die kontinuierliche Einspeisung mit MUWC fiel in Block 4 der Füllstand im Kondensatvorratsbehälter CST bis 12.30 Uhr am 12. März von anfänglich 8,7 m auf nur noch 4,2 m. Zwar standen noch zwei Frischwasservorratsbehälter zur Verfügung, doch der Krisenstab entschied, diese Vorräte für die Blöcke 1 und 2 zu reservieren, deren Anlagenzustand als am kritischsten angesehen wurde.

Um die Wasservorräte im Kondensatvorratsbehälter CST von Block 4 zu schonen, musste daher nochmals die Fahrweise verändert und auf das motorgetriebene Hochdruck-Kernsprühsystem (HPCS) umgeschaltet werden, welches auf eine Stromzufuhr angewiesen war. So wurde in Block 4 die Füllstandshaltung im Reaktordruckbehälter mit dem HPCS bis zum Mittag des 14. März aufrechterhalten.