

# **Risiken betrieblich bedingter Brüche von Dampferzeuger- Heizrohren infolge Spannungsrisskorrosion**

**Fachliche Stellungnahme  
von Prof. Dr.-Ing. habil. Manfred Mertins**

im Auftrag von .ausgestrahlt

Hamburg/Köln, 06. November 2018

## **Kontakt:**

Prof. Dr.-Ing. habil. Manfred Mertins, Tel: +49 (0) 172 38 47 051

info@mertins-safety.de, www.mertins-safety.de

.ausgestrahlt, Große Bergstraße 189, 22767 Hamburg

info@ausgestrahlt.de, www.ausgestrahlt.de

Spendenkonto: .ausgestrahlt e.V. IBAN DE51 4306 0967 2009 3064 00 | BIC:

GENODEM1GLS | GLS Bank

Spenden sind steuerlich absetzbar.

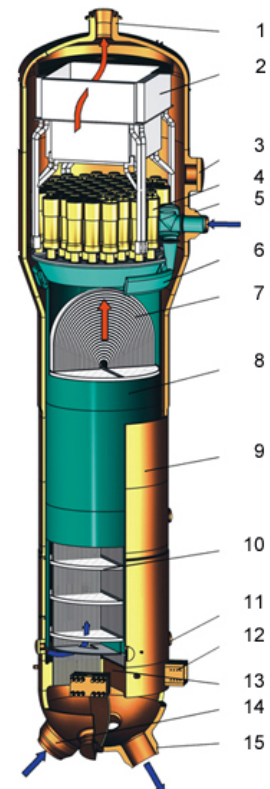
**•ausgestrahlt**  
gemeinsam gegen atomenergie

## I. Aufgabe und Funktion der Dampferzeuger in einem AKW mit Druckwasserreaktor

Die Dampferzeuger in AKW mit Druckwasserreaktor (DWR; alle noch laufenden AKW in Deutschland mit Ausnahme von Gundremmingen C sind Druckwasserreaktoren und haben jeweils vier Dampferzeuger) fungieren als Wärmetauscher zwischen Primär- und Sekundärkreis (zu Aufbau und Funktionsweise eines AKW mit DWR siehe Anhang). **Die ca. 4.000 U-Rohre pro Dampferzeuger (Aufbau eines Dampferzeugers siehe Bild 1) werden vom heißen und radioaktiv belasteten Primärkühlmittel durchströmt.**

Sekundärseitiges Speisewasser umströmt die U-Rohre (Dampferzeuger-Heizrohre, im Folgenden als DE-Heizrohre bezeichnet) und verdampft. Vier getrennte Frischdampfleitungen als Teil des Frischdampfsystems (FD-System) führen von den Dampferzeugern zum Hochdruck(HD)-Teil der Turbine. Im Frischdampfsystem sind mehrere Armaturen mit unterschiedlichen betrieblichen und sicherheitstechnischen Aufgaben vorhanden:

- Frischdampfabschlussarmatur: Absperrn der Frischdampfleitung, z. B. bei Beschädigung der Frischdampfleitung,
- FD-Abblaseabsperrventil: während des Normalbetriebs geschlossen, wird bei Ausfall der Hauptwärmesenke geöffnet, um den Druck im FD-System kontrolliert abzusenken,
- Absperrarmatur vor Sicherheitsventil: im Normalbetrieb geöffnet, wird nur geschlossen, wenn das FD-Sicherheitsventil in Offenstellung versagt,
- **FD-Sicherheitsventil:** wird bei einem FD-Druck von ca. 88 bar geöffnet, ist in der Lage, die Vollastfrischdampfmenge eines Dampferzeugers abzublasen. **Das Abblasen des Frischdampfes erfolgt außerhalb des Containments, also direkt in die Atmosphäre.**



- 1 Dampfaustritt
- 2 Feinabscheider (Dampfrockner)
- 3 Mannloch
- 4 Grobabscheider (Wasser)
- 5 Speiswassereintrittsstutzen
- 6 Speiswasserringleitung
- 7 Heizrohre
- 8 Leitmantel
- 9 Behälter
- 10 Rohrhaltegitter
- 11 Handloch
- 12 Trag- und Führungspratzen
- 13 Rohrboden
- 14 Kühlmiteleintritt
- 15 Kühlmittelaustritt

Bild1: Prinzipdarstellung eines Dampferzeugers in einem AKW mit DWR ([https://www.kkg.ch/de/i/dampferzeuger-\\_content---1--1074.html](https://www.kkg.ch/de/i/dampferzeuger-_content---1--1074.html))

## II. Sicherheitstechnische Bedeutung der Dampferzeuger-Heizrohre

Die DE-Heizrohre sind Bestandteile der druckführenden Umschließung des Primärkühlmittels (dfU, siehe hierzu Ausführungen im Anhang). **Die Heizrohre stellen die sicherheitstechnisch wichtige Schnittstelle zwischen dem Primärkreislauf und dem sekundärseitigen Wasser-Dampf-Kreislauf beim AKW mit DWR dar.** Hieraus resultiert ihre hohe sicherheitstechnische Bedeutung in Bezug auf den Schutz gegen den Austritt radioaktiver Stoffe in die Umgebung.

Der Wärmeaustausch zwischen den beiden Kreisläufen erfolgt mittels der DE-Heizrohre. **Schäden an der Vielzahl von DE-Heizrohren sind im Leistungsbetrieb nicht auszuschließen und führten weltweit bereits mehrfach zum Austausch kompletter Dampferzeuger.** Einzelne beschädigte DE-Heizrohre werden üblicherweise verschlossen und nehmen somit am Prozess des Wärmeaustausches nicht mehr teil.

## III. Besondere Bedeutung der Spannungsrissskorrosion unter Sicherheitsaspekten

**Spannungsrissskorrosion** bezeichnet eine spezielle Form der Rissbildung in unter Spannung stehenden Werkstoffen. Die entsprechenden Randbedingungen vorausgesetzt tritt sie **unvorhersehbar** auf und **die entstehenden Risse können sehr schnell wachsen.**

Für das Auftreten von Spannungsrissskorrosion müssen drei Bedingungen erfüllt sein:

- der Werkstoff muss empfindlich gegen Spannungsrissskorrosion sein,
- Zugspannungen müssen vorliegen,
- ein spezifisches Angriffsmittel muss vorhanden sein. Als spezifische Angriffsmittel wirken etwa Chloride.

**All diese Bedingungen treten an den Dampferzeuger-Heizrohren auf.**

Die Schädigung von DE-Heizrohren im Bereich der Einwalzungen der DE-Heizrohre im Rohrboden und der Abstandsgitter zwischen den DE-Heizrohren durch sogenannte interkristalline Spannungsrissskorrosion (IkSpRK) ist ein bekanntes Phänomen. In diesen Bereichen, bei denen keine oder nur geringe Durchströmung stattfindet, ist eine Aufkonzentration von Chloriden und anderen korrosionsfördernden Verunreinigungen möglich. Dadurch bedingte wanddurchdringende Schäden (Risse) an einzelnen DE-Heizrohren im Leistungsbetrieb oder gar Brüche von DE-Heizrohren führen auf Grund der unterschiedlichen Druckverhältnisse (Primärseite ca. 160 bar, Sekundärseite ca. 65 bar) zum Übertritt von Primärkühlmittel in den Wasser-Dampf-Kreislauf der Sekundärseite und somit zur **Freisetzung radioaktiver Stoffe in die Umgebung.**

## IV. Auslegungsstörfall und auslegungsüberschreitender Störfall

Der Auslegung von AKW in Deutschland liegt als einer der Auslegungsstörfälle der vollständige Bruch eines DE-Heizrohres mit einem doppelendigen Ausströmungsquerschnitt (2 F) zugrunde (Ereignis D3-31 gemäß den Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke). **Die Beherrschung eines solchen Störfalles erfordert ein komplexeres Vorgehen als bei den meisten anderen Störfällen**, die bei der Auslegung von AKW zu berücksichtigen sind.

**Auch einen Auslegungsstörfall dürfen weder Betreiber noch Aufsichtsbehörden billigend in Kauf nehmen.** Vielmehr müssen sie gemäß Atomgesetz und Strahlenschutzverordnung dafür Sorge tragen, dass ein solcher Störfall sicher nicht eintritt.

Wanddickenschwächungen (Risse) und Lecköffnungen an DE-Heizrohren vermindern deren Grenztragfähigkeit: Derart **vorgeschädigte Rohre können insbesondere in Belastungssituationen (Druckstöße, Erschütterungen, ...) leichter reißen.** Aufgrund der möglichen Folgen eines solchen Heizrohrschadens und der dadurch freigesetzten Radioaktivität **haben Wanddickenschwächungen an DE-Heizrohren einen erheblichen Einfluss auf die Sicherheit von Kernkraftwerken** mit Druckwasserreaktor (DWR).

**DE-Heizrohrlecks mit Leckquerschnitten > 2 F sind auslegungsüberschreitend. Insbesondere bei korrodierten Heizrohren können auslegungsüberschreitende Leckquerschnitte nicht ausgeschlossen werden.** Als Ursachen hierfür kommen z. B. infrage:

- **Gleichzeitige Leckbildung an mehreren DE-Heizrohren** aufgrund von Korrosionsmechanismen,
- gleichzeitiges Lösen mehrerer Verschlussstopfen,
- **Folgeschäden an Nachbarrohren**, etwa durch nach einem Heizrohrbruch umherschlagende Rohrenden oder unter hohem Druck austretendes Wasser, **insbesondere bei vorhandener Vorschädigung der Nachbarrohre**,
- **Folgeschäden aufgrund von Belastungen** aus Störfällen wie Lecks und Brüche im Speisewasser- und Frischdampfbereich, **insbesondere bei vorhandener Vorschädigung der Rohre.**

## V. Folgen von Lecks an den Dampferzeuger-Heizrohren

Eine besondere sicherheitstechnische Bedeutung von auslegungsüberschreitenden Störfällen mit Leckquerschnitten > 2 F ergibt sich daraus, dass hierdurch neben einer **erheblichen Freisetzung von Primärkühlmittelaktivität** auch ein **erheblicher Verlust von Primärkühlmittel** unter **Umgehung des Sicherheitsbehälters** (sog. **Bypass-Ereignisse**) entsteht. Durch Bypass-Ereignisse wird somit die Barrierenfunktion des Containments unwirksam. Hier unterscheiden sich übrige Kühlmittelverluststörfälle deutlich von denen im Bereich der Dampferzeuger, denn eine Umgehung der Barriere Containment ist bei den übrigen Kühlmittelverluststörfällen nicht unmittelbar zu befürchten.

Beim DE-Heizrohrbruch handelt es sich also um einen **Kühlmittelverlust-Störfall** in den Sekundärkreis **unter Umgehung des Sicherheitseinschlusses**, wodurch beim störfallbedingten Öffnen von Frischdampfarmaturen (z. B. Frischdampfsicherheitsventil) im Bereich des defekten

Dampferzeugers infolge des Druckausgleiches zwischen Primär- und Sekundärkreis eine **direkte und unmittelbare Verbindung zur Atmosphäre** besteht.

Relevant für das Potenzial einer hohen Aktivitätsfreisetzung beim Störfall DE-Heizrohrbruch wäre ein länger anhaltender hoher Druck im Primärkreis, der zu einer hohen Leckrate in den Sekundärkreis führt. Dieser kann ereignisablaufbedingt z. B. durch die primärseitigen Sicherheitseinspeisepumpen aufgeprägt werden oder durch die Unverfügbarkeit der primärseitigen Hauptkühlmittelpumpen entstehen. Insofern zielen die Maßnahmen zur Störfallbeherrschung darauf ab, solche Zustände im Störfallablauf zu vermeiden. Insbesondere soll der Primärkreisdruck rasch dem Druck im Sekundärkreis angeglichen werden, sodass der Übertritt von Primärkühlmittel in den Sekundärkreislauf begrenzt werden kann.

**Prinzipiell besteht schon bei einem auslegungsgemäßen Störfallablauf die Gefahr, dass durch das aus dem defekten Heizrohr ausströmende Wasser der Druck im Dampferzeuger so weit ansteigt, dass die Frischdampfsicherheitsventile öffnen und eine direkte Verbindung vom Primärkreis in die Umgebung schaffen. Dies gilt erst recht bei einem auslegungsüberschreitenden Störfallablauf, etwa beim Bruch mehrerer Heizrohre (Leckquerschnitt > 2 F).**

Aus technischer Sicht besteht in der Folge der Öffnung eines Frischdampfsicherheitsventils die Möglichkeit, dass dieses Sicherheitsventils in Offenstellung hängenbleibt, womit eine direkte Verbindung vom Reaktorkern zur Umwelt gegeben wäre. In einem solchen Zustand wäre eine **ungehinderte Freisetzung von Radioaktivität in die Umwelt** sowie der **Verlust von Primärkühlmittel** die Folge. **In der Tendenz wären Schäden an den Brennelementen infolge unzureichender Kühlung der Brennelemente, einschließlich des Erreichens von Schmelzzuständen des Reaktorkerns mit erheblichen Freisetzungen radioaktiver Stoffe in die Umwelt, nicht mehr auszuschließen.**

## VI. Wesentliche Quellen

- 428. Sitzung der Reaktor-Sicherheitskommission am 15.07.2010, Stellungnahme der RSK: Schäden an Dampferzeuger(DE)-Heizrohren durch Spannungsrisskorrosion – Ursache und Nachweis
- RSK-Stellungnahme (447. Sitzung am 03.05.2012), Zu unterstellende Leckagen an Dampferzeuger(DE)-Heizrohren, Mehrfachrohrbruch / Lecköffnung wanddickengeschwächter DE-Heizrohre

## VII. Anhang

### VII.1 Energieerzeugung und Energieübertragung in einem Atomkraftwerk

Der Prozess der Energieerzeugung und Energieübertragung in einem Atomkraftwerk (AKW) mit Druckwasserreaktor (DWR) ist schematisch in Bild 2 dargestellt.

Eine DWR-Anlage ist dadurch charakterisiert, dass die Dampferzeugung zum Antreiben der Turbine über zwei voneinander getrennte Kreisläufe, dem Primär- und dem Sekundärkreislaufsystem erfolgt. Die im Reaktor erzeugte Wärme wird über Dampferzeuger vom primären Reaktorkühlkreislauf an den sekundären Wasser-Dampf-Kreislauf abgegeben. Dem Primärkreislauf wird durch einen Druckhalter ein ausreichend hoher Druck aufgeprägt, um ein Verdampfen des Kühlmittels im Reaktor zu vermeiden.

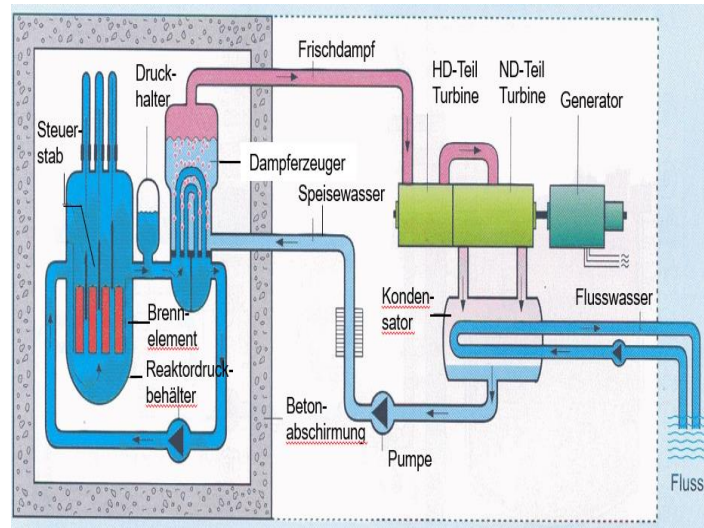


Bild 2: Darstellung des Prozesses der Energieerzeugung und der Energieübertragung in einem AKW (vereinfacht)

Das Reaktorkühlsystem (Bild 3) besteht bei neueren Anlagen aus vier primären Reaktorkühlkreisläufen, in denen jeweils eine Hauptkühlmittelpumpe das Kühlmittel zwischen Dampferzeuger und Reaktordruckbehälter umwälzt, und einem Druckhalter, der über eine Volumenausgleichsleitung mit dem Reaktorkühlsystem verbunden ist. Als Kühlmittel dient entgast, vollentsalztes und im gewissen Umfang boriertes Wasser. Die Reaktorleistung wird über die Stellung der Steuerstäbe und über die Änderung der Borkonzentration des Kühlmittels geregelt.

Die Wärme, die bei der Kernspaltung in den Brennelementen des Reaktorkerns (Nr. 1, Bild 3) entsteht, führt zur Aufwärmung des Primärkühlmittels (Wasser) von ca. 290 auf ca. 325 °C im Reaktordruckbehälter (Nr. 2, Bild 3). Die Zirkulation des Primärkühlmittels wird durch Kühlmittelpumpen (Nr. 7 in Bild 3) sichergestellt. Das aufgewärmte, unter einem Druck von ca. 160 bar stehende Wasser wird in die Dampferzeuger (Nr. 6, Bild 3) gepumpt, wobei dort Wasserdampf entsteht. Der unter Druck von ca. 65 bar stehende Wasserdampf wird einer mehrstufigen Dampfturbine zugeführt, die einen Generator mit einer Leistung von ca. 1350 MW (elektrisch) antreibt.

Der Prozess der Elektroenergiegewinnung in einem AKW lässt sich wie folgt zusammenfassen:

- Durch Kernspaltung im Reaktorkern Erzeugung von Wärmeenergie,
- mit der Wärme des Reaktorkerns Erzeugung von Wasserdampf im Dampferzeuger,
- Wasserdampf unter hohem Druck treibt Dampfturbine an,
- Bewegung der Turbine erzeugt elektrische Energie im Generator.

## VII.2 Barrierenkonzept in einem AKW mit DWR

Als wesentliches Element der Sicherheit eines AKW gilt das Barrierenkonzept. Das Barrierenkonzept umfasst mehrere hintereinander gestaffelte Barrieren und soll damit dem Schutz gegen den Austritt radioaktiver Stoffe aus einem AKW dienen.

Die wesentlichen Barrieren sind, von innen nach außen betrachtet:

- die Brennstab-Hüllrohre (Nr. 1 im Bild 3),
- der Reaktordruckbehälter mit den Rohrleitungen des Primärkreises (Nr. 2 im Bild 3 und Bild 4) und
- der Sicherheitsbehälter (Containment, Nr. 8, 9 im Bild 3).

Der Sicherheitsbehälter mit den dazugehörigen Einrichtungen als dritte dieser Barrieren umschließt den Reaktordruckbehälter und den daran anschließenden Teil des Kühlmittelkreislaufs.

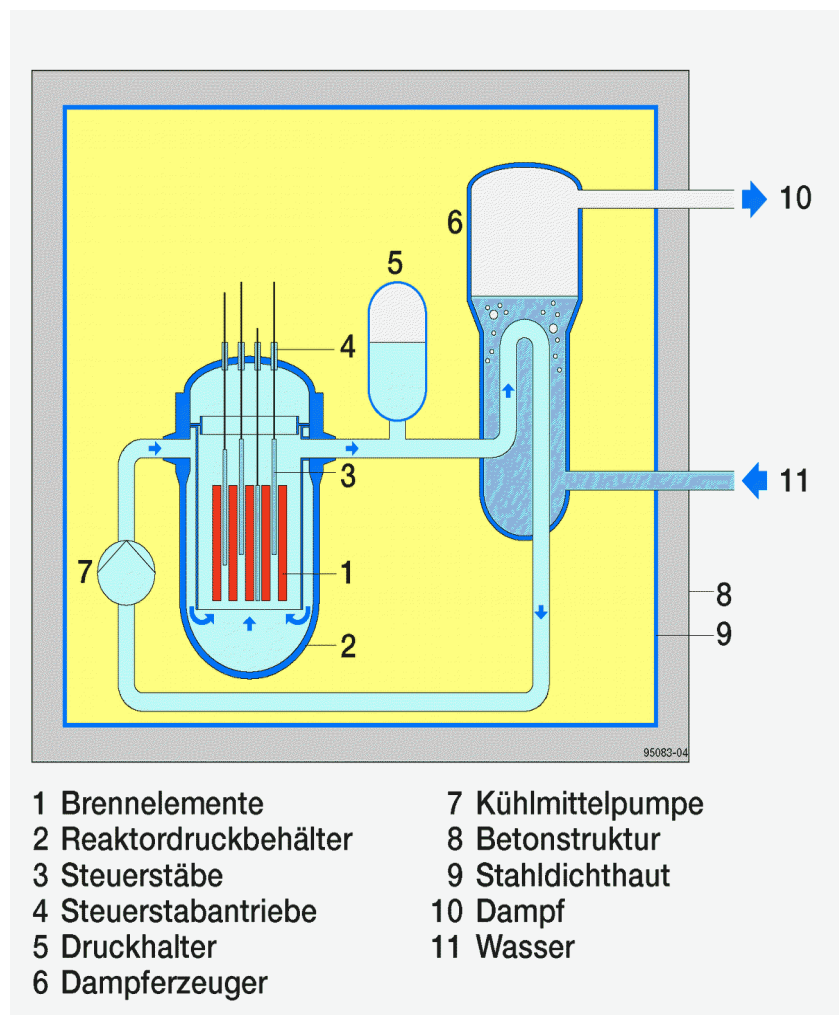


Bild 3: Darstellung der Barrieren in einem AKW mit Druckwasserreaktor (vereinfacht)

### VII.3 Druckführende Umschließung in einem AKW mit DWR

Der Bereich des Primärkreises, der unter Primärkreisdruck steht, wird als druckführende Umschließung (dfU) bezeichnet. Der Gesamtumfang der dfU in einem AKW mit DWR ist in Bild 4 dargestellt.

Zur dfU sind damit zu zählen:

- der Reaktordruckbehälter
- die vier Hauptkühlmittelleitungen mit den Hauptkühlmittelpumpen
- der Druckhalter
- die Heizrohrleitungen in den vier Dampferzeugern (je Dampferzeuger ca. 4.000 U-Rohre, siehe hierzu Bilder 2 und 3)

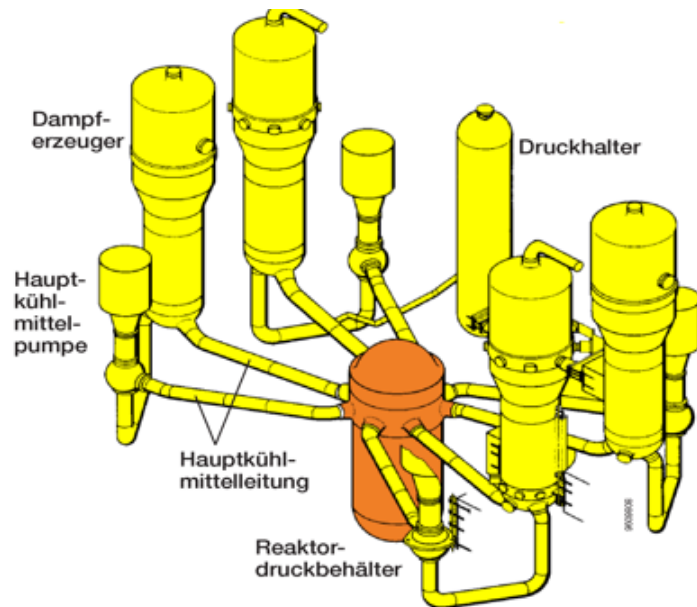


Bild 4: Übersicht über die druckführende Umschließung in einem AKW mit DWR