

## **FAQ-Liste zum Stillstand des Kernkraftwerks Brokdorf 2017 (Überhöhte Oxidschichtdicken an Brennstäben)**

### **1. Wie ist es zu dem langen Stillstand des KKW Brokdorf im Jahre 2017 gekommen?**

Während der Jahresrevision – einer jährlichen Überprüfung des Kernkraftwerks Brokdorf verbunden mit einem Brennelementwechsel – wurden an Brennstäben im Reaktorkern Oxidschichten festgestellt, die dicker waren und schneller und an anderen Stellen auftraten als erwartet. An einigen Brennstäben wurden die Grenzwerte deutlich überschritten. Seitdem befindet sich das Kernkraftwerk nicht im Leistungsbetrieb. Das Kernkraftwerk darf erst wieder ans Netz gehen, wenn ausgeschlossen werden kann, dass sich ein derartiges Ereignis wiederholt. Die Untersuchungen zur Klärung der Ursachen und die Sicherstellung der Einhaltung der sicherheitstechnischen Randbedingungen erforderten eine vertiefte und gründliche Bewertung. Daneben waren weitere Ereignisse und revisionstypische Vorgänge abzuarbeiten und zu bewerten.

### **2. Wodurch wurde man auf die verstärkte Oxidbildung aufmerksam?**

Das Kernkraftwerk Brokdorf wurde am 4. Februar 2017 zum jährlichen Brennelementwechsel und zu der damit verbundenen Revision vom Netz genommen. Während des diesjährigen Anlagenstillstandes sollte der Reaktordruckbehälter mit 60 neuen Brennelementen beladen werden. Beim Entladen von Brennelementen wurden im Reaktorwasser außergewöhnlich viele Schwebstoffe festgestellt, die sich als abgelöste Teile der Oxidschichten an Brennstäben einer bestimmten Brennelementsorte herausstellten. Gezielte Messungen ergaben Schichtdicken, die die Grenzwerte und Zuwachsprognosen an einigen Stellen deutlich überschritten.

### **3. Wie viele Brennstäbe und Brennelemente sind von der verstärkten Oxidbildung betroffen?**

Von der verstärkten Oxidbildung war eine Teilmenge der im letzten und vorletzten Zyklus eingesetzten Brennelemente betroffen. Dabei handelte es sich ausschließlich um Brennstabhüllrohre aus dem Material M5, wobei allerdings nicht jeder M5-Brennstab betroffen war. Insgesamt wurden mit den verschiedenen Messverfahren 92 M5-Brennelemente, dabei 5.405 Brennstäbe vermessen. Davon wiesen 464 Brennstäbe einen erhöhten Oxidbefund unterhalb des Grenzwertes auf, wobei an 10 Brennstäben Oxidschichtdicken größer als 100 Mikrometer gemessen wurden.

#### **4. Wieso bilden sich Oxidschichten an Brennstäben? Ist das normal?**

Die Brennstäbe werden im Reaktorkern mit boriiertem Wasser gekühlt. Durch die Strahlung im Reaktorkern werden die Wassermoleküle des Kühlmittels in Sauerstoff und Wasserstoff aufgespalten (Radiolyse). Der Sauerstoff kann dabei im Reaktorbetrieb mit der heißen Metalloberfläche des Brennstabhüllrohres reagieren. Dort bildet sich dann eine leichte Oxidschicht aus. Dies ist ein normaler Prozess und im Prinzip nicht bedenklich. Die Schichtdicke darf aber ein bestimmtes Maß nicht überschreiten, da dann das etwa 0,7mm (= 700 Mikrometer) dicke Hüllrohr der Brennstäbe unzulässig geschwächt wird und die Wärmeabgabe an das Kühlmittel verschlechtert wird.

#### **5. Ab wann ist die Oxidschicht zu dick?**

Der Grenzwert für die gesamte Einsatzdauer eines Brennelementes (in der Regel bis zu 5 Zyklen, das entspricht etwa 5 Jahren) liegt bei einer Oxidschichtdicke von höchstens 100 Mikrometern (ein Mikrometer entspricht einem tausendstel Millimeter). Dieser Grenzwert wurde bei mehreren Brennstäben überschritten, obwohl sie erst zwei Zyklen im Einsatz waren – davon war der letzte Zyklus eher kurz. In einem Fall wurde punktuell sogar eine Oxidschicht von 152 Mikrometern gemessen.

#### **6. Was kann eigentlich passieren, wenn die Oxidschicht an einem Brennstab zu dick ist?**

Mit wachsender Oxidschicht nimmt die Restwandstärke des Brennstabes ab, die Wand wird also dünner. Ab einem bestimmten Maß kann es zu einem Integritätsverlust des Hüllrohres kommen. Dann können radioaktive Stoffe in das Primärkühlmittel gelangen, wo diese registriert werden und die Anlage bei Überschreitung der Aktivitätsgrenzwerte heruntergefahren werden muss. Außerdem kann bei einer zu starken Oxidschicht die Wärme vom Brennstab in das Kühlmittel nicht mehr so abgeführt werden wie vorgesehen. Der Wärmeübertrag würde also unzulässig beeinflusst werden. Um dieses zu verhindern, werden vor jedem Einsatz eines neuen Reaktorkerns Prognosewerte für die Oxidschichten anhand von Rechenmodellen ermittelt.

#### **7. Ist durch die Oxidation der Brennstäbe eine erhöhte Strahlenbelastung für die Bevölkerung entstanden?**

Die festgestellte Oxidation der Brennstäbe hat zu keinem Integritätsverlust der Brennstäbe geführt, so dass keine radioaktiven Stoffe freigesetzt worden sind. Aber selbst bei einem Integritätsverlust würde es zu keiner erhöhten Strahlenbelastung der Bevölkerung kommen, weil die radioaktiven Stoffe im Primärkreis verbleiben und die Anlage kontrolliert abgefahren werden würde. Die Anlage verfügt hierzu über das Reaktorwasserreinigungssystem, mit dem das Primärkreis-Kühlmittel gereinigt und die radioaktiven Stoffe herausgefiltert werden.

#### **8. Was ist die Ursache für die überhöhten Oxidschichtdicken, die 2017 im KKW Brokdorf festgestellt wurden?**

Nach Feststellung der schleswig-holsteinischen Atomaufsicht hat ein Zusammenspiel von mehreren Faktoren zu der unerwartet starken und schnellen Oxidation geführt. Neben dem Hüllrohrmaterial sind die hohen Leistungsanforderungen verantwortlich: der Hochleistungskern und ein immer häufigeres, schnelles Hoch- und Runterfahren des Reaktors – der sogenannte Lastfolgebetrieb. So war 2006 eine Leistungserhöhung genehmigt worden, die eine elektrische Bruttoleistung von 1480 statt zuvor 1440 Megawatt ermöglichte. Seit 2011 praktizierte der Betreiber zudem immer häufiger den Lastfolgebetrieb, je nach Auslastung der Stromnetze. Gerade in den Betriebszyklen von 2015 an wurde diese Lastwechselfahrweise weiter intensiviert. Hinweise auf etwas erhöhte Korrosion gab es seit 2011, der Grenzwert wurde erstmals Anfang 2017 überschritten. Das Hüllrohrmaterial M5 blieb mit derselben Spezifikation das Gleiche – vor 2006 und danach. Aber unter den geänderten Einsatzbedingungen zeigten sich an einigen Brennstabhüllrohren des sonst grundsätzlich sehr korrosionsbeständigen Materials Oxidationsschichten im oberen Bereich, wo diese nicht erwartet wurden, und in einer Wachstumsrate, die ebenfalls über dem Erwartungswert lag.

#### **9. Es heißt nun, schon seit 2011 sei stärkere Oxidation festgestellt worden. Warum hat die Aufsichtsbehörde nicht früher reagiert?**

Bislang wurden im Kernkraftwerk Brokdorf – wie auch in anderen Kernkraftwerken – keine Grenzwerte für die Oxidschichten an M5-Brennstäben überschritten. Im Jahr 2011 waren im Rahmen von Brennelementinspektionen erste leichte visuelle Auffälligkeiten festgestellt worden, die zur weiteren Beobachtung führten. Die daraufhin im Jahr 2013 durchgeführten Messungen der Oxidschichtdicken lagen unterhalb der Grenzwerte. Während des Brennelementwechsels 2014 waren erneut Messungen durchgeführt worden. Gegenüber 2013 war keine signifikante Erhöhung der Oxiddicke festgestellt worden.

## **10. Wieso ist man nicht früher auf den Lastfolgebetrieb als Ursache gekommen?**

Die Betrachtung aller möglichen physikalischen und chemischen Einflussfaktoren für das Oxidwachstum ist sehr komplex. Im Rahmen der Untersuchungen wurden verschiedene Thesen intensiv untersucht und geprüft, welche Relevanz sie haben. Dazu gehörten Fragen zum Hüllrohrmaterial, der Chemie des Primärkühlmittels und thermohydraulische Einsatzbedingungen. Hierzu hat die Aufsichtsbehörde neben dem TÜV NORD weitere Gutachter mit unterschiedlichen Untersuchungsschwerpunkten hinzugezogen und alle verfügbaren Informationen aus Wissenschaft und Literatur berücksichtigt. Bei genauer Prüfung der Thesen durch die Sachverständigen und die Atomaufsicht fielen in den meisten Thesen jedoch immer wieder Lücken oder Widersprüche auf, so dass die Erklärungsmodelle der Betreibergesellschaft nicht belegt werden konnten. Damit blieb angesichts des weiterhin für den Einsatz vorgesehenen Hüllrohrmaterials nur die Möglichkeit, die Leistungsbedingungen insgesamt auf den gesicherten Erfahrungsstand zurückzuführen und so die Ursache der Korrosion auszuschalten.

## **11. Wie kann das Problem jetzt behoben werden, so dass ein sicherer Betrieb des Kernkraftwerks möglich ist und sich die unerwartet starke Oxidation nicht wiederholt?**

Die Untersuchungen im Rahmen des meldepflichtigen Ereignisses haben gezeigt, dass die verfahrenstechnischen Randbedingungen und die Betriebsweisen des Kernkraftwerks einen erheblichen Einfluss auf das Oxidschichtwachstum an den Brennstäben haben. Daher werden für den kommenden Zyklus mehrere verfahrenstechnische Änderungen an der Fahrweise und an den physikalischen Randbedingungen vorgenommen werden, u. a. die Begrenzung der thermischen Reaktorleistung auf 95 Prozent und die Begrenzung des Leistungsgradienten auf 10 MW/min. Die Lastwechselgeschwindigkeit wird also gegenüber der derzeitigen Fahrweise (bis 20 MW/min) halbiert. Damit werden wieder Betriebsbedingungen hergestellt, wie sie vor der Leistungserhöhung 2006 galten. Für diesen Zeitraum gibt es gesicherte Betriebserfahrungen mit dem Hüllrohrmaterial M5 ohne unerwartete, starke und schnelle Oxidation.

## **12. Welche Maßnahmen werden zusätzlich ergriffen?**

Des Weiteren wird zur Vermeidung oxidativer Randbedingungen die Wasserstoffkonzentration im Primärkühlmittel von derzeit 2-3 mg/kg auf 3-4 mg/kg angehoben und die Überwachung durch kontinuierliche Messungen verbessert.

### **13. Ist denn damit alles geklärt oder sind noch weitere Untersuchungen notwendig?**

Welche Faktoren zu der starken Oxidation geführt haben, ist soweit erkannt und bewertet, dass mit der Reduktion von Leistung und Lastfolgebetrieb ein sicherer Betrieb möglich ist. Noch nicht schlüssig, abdeckend und widerspruchsfrei sind die chemischen und physikalischen Einzelparameter (etwa ein bestimmter Legierungsbestandteil) und ihr quantitativer Beitrag zu dem Prozess geklärt. Da zum Teil im Reaktorkern lokal begrenzte Randbedingungen als Ursache unterstellt wurden, die jedoch messtechnisch nicht zugänglich sind, konnten die von der Betreibergesellschaft und dem Hersteller aufgestellten Thesen sowie auch von den Sachverständigen eingebrachte Modelle bezüglich eines physikalisch/chemischen Prozesses bisher nicht bestätigt werden. Der Betreibergesellschaft bleibt es unbenommen, in Zukunft noch den Nachweis zu führen, dass lediglich Einzelparameter, etwa nur die Wasserstoffkonzentration, maßgeblich sind. Die Sachverständigen haben diesbezüglich noch weitere Erkenntnismöglichkeiten aufgezeigt, etwa Werkstoffprüfungen am oxidierten Material oder die weiter vertiefte Untersuchung thermodynamischer Effekte.

### **14. Können auch andere Kernkraftwerke in Deutschland betroffen sein?**

Eine auffällige Korrosion von Brennstäben ist in der Vergangenheit auch in anderen deutschen Kernkraftwerken beobachtet worden. In Brokdorf wurden jetzt erstmals genehmigte Grenzwerte überschritten.

Die jeweils möglichen maximalen Brennstableistungen hängen von der reaktorphysikalischen Auslegung der jeweiligen Reaktorkerne ab. Die Häufigkeit des Lastfolgebetriebs und die Laständerungsgeschwindigkeit variieren von Anlage zu Anlage.

### **15. Müssen die anderen Länder bzw. der Bund jetzt auch Leistung und Lastfolge reduzieren lassen?**

Nach Kenntnis der schleswig-holsteinischen Atomaufsicht hat es in den anderen deutschen Kernkraftwerken keine Überschreitung von maximal zulässigen Oxidschichten gegeben.

### **16. Welche Parallelen gibt es zwischen der Korrosion von Brennstäben im KKW Leibstadt und im KKW Brokdorf?**

Bei der Jahresrevision im KKW Leibstadt wurden im Jahre 2016 an Brennelementen, die nicht länger als ein Jahr im Betrieb gewesen waren, Brennstäbe mit überhöhten Oxidschichtdicken festgestellt. Parallelen gibt es im schnellen Oxidwachstum und im örtlich auf das obere Ende der Brennstäbe begrenzten Auftreten des Oxidmaximums. Ansonsten unterscheiden sich die Hersteller und die Materialien der Hüllrohre und der Reaktortyp (Brokdorf ist ein Druckwasserreaktor, Leibstadt ein Siedewasserreaktor) grundsätzlich.

**17. Wird beim Brennelementwechsel an jedem Brennstab die Dicke der Oxidschicht gemessen?**

Für die Inspektion der Brennelemente in einem Brennelementwechsel besteht eine Prüfanweisung, in der der Prüfumfang und die Prüfinhalte festgelegt sind. Vor jedem Brennelementwechsel wird der genaue Prüfumfang und -inhalt mit der Behörde und den Sachverständigen vereinbart, um aktuelle Prüf Aspekte berücksichtigen zu können. Dabei wird eine repräsentative Anzahl von Brennelementen, die im vorangegangenen Zyklus zum Einsatz kamen und im nächsten Zyklus wieder eingesetzt werden sollen, visuell inspiziert. Zum Prüfumfang gehört u.a. die Bewertung der Hüllrohrkorrosion. Werden bei dieser visuellen Prüfung Auffälligkeiten festgestellt, so werden weitere Prüfungen, wie z.B. Messungen der Oxidschichtdicke durchgeführt. Der Reaktorkern besteht aus 193 Brennelementen in der Anordnung von 16x16 Brennstäben, wobei einige Brennstabpositionen durch Strukturteile (z.B. Steuerstabführungsrohre) belegt werden, so dass die Anzahl der Brennstäbe bei 236 pro Brennelement liegt. Auf Grund konstruktiver Gegebenheiten kann die Messung der Oxidschichten nicht an jedem Brennstab vorgenommen werden. Es wird ein repräsentativer Umfang ausgewählt. Der Umfang der zu vermessenden Brennstäbe wird mit der Aufsichtsbehörde und den Sachverständigen abgestimmt.

**18. Die Atomaufsicht hat der Beladung des Reaktorkerns nun zugestimmt. Was hat sie denn vorher geprüft?**

Bei der sogenannten Folgekernprüfung wird der für den kommenden Zyklus vorgesehene Kern dahingehend überprüft, ob er sicherheitstechnisch unbedenklich betrieben werden kann. Dazu gehört neben der Bewertung der einzusetzenden Kernbauteile (Brennelemente, Steuerelemente, Drosselkörper, Instrumentierungen) insbesondere die Bewertung

- der neutronenphysikalischen Auslegung
- der thermohydraulischen Auslegung des Reaktorkerns

- der mechanischen Auslegung (hier wird z.B. die prognostizierte Oxidschichtdicke bewertet)
- des postulierten Verhaltens bei Störfällen und Transienten
- der Nachwärmeabfuhr der entladenen Brennelemente aus dem Brennelementlagerbecken und
- der Radiologie zum Nachweis der Einhaltung der Störfallplanungswerte.

Für die Abschätzung des Betriebsverhaltens des beantragten Kerns werden die Kernauslegung und die Kenngrößen des Reaktorkerns aus dem vorangegangenen Zyklus abschließend geprüft und bewertet, inwiefern diese der Prognose entsprechen. Dieses Vorgehen ist sinnvoll, da die im Kernkraftwerk Brokdorf zulässigen Kerne in ihren bestimmenden Eigenschaften grundsätzlich ähnlich sind und daher Rückschlüsse auf das erwartete Verhalten des neuen Kerns gezogen werden können. Die grundlegende Einhaltung der schriftlichen betrieblichen Regelungen und die Vollständigkeit der eingereichten Unterlagen gehören ebenfalls zum Prüfumfang.

**19. Ist mit der Zustimmung zum Folgekern auch die Zustimmung zum Wiederanfahren des KKW verbunden?**

Nein, hier liegt ein gestuftes Verfahren vor. Wenn die Voraussetzungen zum Beladen des Reaktordruckbehälters mit dem geplanten Folgekern aus sicherheitstechnischer Sicht erfüllt sind, wird zunächst eine Zustimmung für die Beladung des Reaktorkerns mit dem Folgekern erteilt. Nach dem Abschluss der Kernbeladung sind dann noch diverse technische Maßnahmen (z.B. Verschließen des Reaktordruckbehälters, nichtnukleares Aufheizen des Primärkühlkreises) und die Durchführung verschiedener Prüfungen z.B. im Reaktorschutzsystem erforderlich. Erst wenn alle Maßnahmen und Prüfungen erfolgreich abgeschlossen sind, aus sicherheitstechnischer Sicht alle Anforderungen erfüllt sind und die Anlage sich technisch anfahrbereit erklärt hat, kann die Zustimmung zum Wiederanfahren des KKW erteilt werden. Mit der Zustimmung zum Wiederanfahren wird auch die Eignung des Folgekerns festgestellt.