

Pu-239 weist eine Spaltresonanz im oberen Energiebereich des thermischen Neutronenspektrums auf. Welche Probleme können dadurch entstehen? (4P)

Eine steigende Temperatur im Reaktor kann in diesem Fall den über das Spaltspektrum gemittelten Wirkungsquerschnitt für die Kernspaltung und damit die thermische Nutzung und erhöhen. Dies geschieht zum einen durch eine Resonanzverbreiterung durch den nuklearen Doppler-Effekt und zum anderen durch die Härtung des thermischen Neutronenspektrums mit steigender Temperatur. Dies kann im schlimmsten Fall einen positiven Temperaturkoeffizienten der Reaktivität bewirken, was im Hinblick auf die Stabilität des Reaktors inakzeptabel ist.

---

Welche Wechselwirkungen gehen Neutronen mit Atomkernen ein (jeweils ein Satz zur kurzen Erklärung)?

Spaltung: Durch den Einfang eines Neutrons zerfällt der Kern in (meistens) zwei Spaltprodukte; es wird Energie freigesetzt

Absorption: Das Neutron trifft auf den Kern und wird von ihm absorbiert; die Atommasse steigt um 1. In der Regel befindet sich der Tochterkern in einem angeregten Energiezustand und kehrt durch Aussendung eines  $\gamma$ -Quants wieder in den Grundzustand zurück.

Elastische Streuung: Das Neutron trifft auf den Kern und es erfolgt keine nukleare Wechselwirkung. In diesem Fall verhalten sich Neutron und Kern wie die Stoßpartner eines elastischen Stoßes in der klassischen Mechanik.

Inelastische Streuung: Im Gegensatz zur elastischen Streuung wird von dem Neutron zusätzliche Energie an den Kern übertragen, die diesen in einen angeregten Energiezustand versetzt. Diese wird anschließend als  $\gamma$ -Quant wieder abgegeben.

$n, x_n$ -Reaktion: Das Neutron setzt aus dem Kern  $x$  (in den meisten Fällen  $x=2$ ) Neutronen frei. Diese Reaktion weist in der Regel eine hohe Schwellenenergie für das eintreffende Neutron auf.

---

Wie entstehen verzögerte Neutronen und welche Bedeutung haben Sie für die Sicherheit eines Kernreaktors? Was passiert bei  $\beta > \beta_{crit}$ ?

Verzögerte Neutronen entstehen bei dem Zerfall bestimmter Spaltprodukte mit extremem Neutronenüberschuss.

Sie führen zu einer deutlichen Erhöhung der mittleren Lebensdauer der Neutronen und damit der Reaktorperiode des Reaktors bei Reaktivitätszufuhr und machen diesen damit überhaupt erst regelbar.

Ein sog. prompt überkritischer Reaktor erreicht auch ohne die verzögerten Neutronen eine divergente Kettenreaktion. Auf Grund der extrem kurzen Reaktorperiode ist eine Regelung nicht mehr möglich; eine Leistungsbegrenzung erfolgt entweder durch negative Temperaturkoeffizienten der Reaktivität oder durch die Zerlegung des Reaktor durch die freigesetzte Energie.

---

Nennen und erklären Sie kurz die zwei wesentlichen heute eingesetzten Technologien zur Urananreicherung. Welche wird sich nach derzeitigem Kenntnisstand mittel- bis langfristig durchsetzen und was ist ihr wesentlicher Vorteil?

Diffusionsmethoden und Gaszentrifugen

Nennen Sie 3 weitere, überholte Technologien zur Urananreicherung! Warum

werden diese heute nicht mehr eingesetzt?

Elektromagnetische Anreicherung, Laseranreicherung, Trenndüsenverfahren

---

---

Mit welchen Maßnahmen könnte man die Aktivität des RDBs weiter reduzieren?

1. Reduktion von Problemelementen, wie Co.
  2. Vergrößerung des Wasserspalts zwischen Reaktor und RDB
  3. Verwendung von Reflektoren
- 
- 

a) Wie hängt die Diffusionslänge mit der Reaktorgröße zusammen? (2 Punkte)

Die Diffusionslänge beschreibt den Weg den ein Neutron von der Entstehung bis zur Absorption zurücklegt. Mit zunehmender Diffusionslänge muss der Reaktor entsprechend größer gebaut werden, um die Neutronenleckage zu minimieren.

b) Wieso sind alle Leistungsreaktoren zylindrisch gebaut, obwohl doch die Kugelgeometrie am wenigsten Spaltstoff benötigt? (3 Punkte)

Zylindrische Geometrien von Seiten der Thermohydraulik besser zu beherrschen. Bei einem kugelförmigen Reaktorkern wäre die Austrittstemperatur aus dem Kern sehr ungleichmäßig verteilt, so dass am Rand die Aufheizung nur minimal wäre, während das Kühlmittel das durch das Zentrum des Reaktorkern strömt sehr stark erhitzt, vlt. sogar verdampft wird. Ein zweiter Aspekt ist, dass bei einer Kugelgeometrie die Brennelemente alle unterschiedliche Abmessungen haben, wodurch ein Umsetzen der Brennelemente sehr erschwert wird.

c) Welche Auswirkungen hat eine Änderung der Temperatur auf das  $k_{eff}$ ? Beschreiben Sie anhand der 6-Faktoren-Formel, welche Faktoren auf Temperaturänderungen reagieren und welches Verhalten sie zeigen. (8 Punkte)

Schnellspaltfaktor: keinen Einfluss

Resonanzentkommwahrscheinlichkeit:

In Abhängigkeit von der Temperatur bewegen sich die Atome. Im Falle einer Temperaturerhöhung bewegen sich die Atome schneller und die Resonanzen verbreitern sich, dadurch kommt es zum Anstieg von Absorptionen im Resonanzbereich, wodurch sich die Resonanzentkommwahrscheinlichkeit reduziert. Weiterhin hat die Moderatorichte auf die Resonanzentkommwahrscheinlichkeit Einfluss. Temperaturänderungen haben einen Einfluss auf die Dichte des Moderators, so reduziert sich die Dichte von Wasser mit steigender Temperatur, wodurch es zu einem Abfall der Bremsdichte kommt, womit sich die Aufenthaltszeit der Neutronen im Resonanzbereich verlängert und folglich die Absorptionswahrscheinlichkeit steigt bzw. die Resonanzentkommwahrscheinlichkeit sinkt.

Thermische Nutzung:

Die Temperaturabhängigkeit der thermischen Nutzung ist abhängig von der Dichte der Nuklide, die in der Regel mit steigender Temperatur abnimmt, und von den Wirkungsquerschnitten, die im thermischen Bereich eine  $1/v$ -Abhängigkeit zeigen. Allerdings gibt es auch Nuklide, die thermische Resonanzen haben, wodurch sogar ein Anstieg des mittleren Wirkungsquerschnitts möglich ist. Generell gilt die Aussage für

Leichtwasserreaktoren, dass die thermische Nutzung einen positiven Temperaturkoeffizienten hat.

Neutronenausbeute:

Temperaturänderungen haben nur sehr geringe Auswirkungen auf die Neutronenausbeute, wenn Absorptions- und Spaltungswirkungsquerschnitt beide dasselbe Verhalten zeigen. Die Anzahl der prompten Spaltneutronen wird mit der Neutronenenergie zwar leicht ansteigen, dies ist aber vernachlässigbar.

Verbleibwahrscheinlichkeiten:

Durch Abnahme der Dichte und des Absorptionsquerschnitts mit steigender Temperatur werden Brems- und Diffusionslänge größer, wodurch die Leckage steigt.

=====  
Beschreiben Sie das Reaktorschutzsystem des Fortschrittlichen Druckwasserreaktors und den Reaktor selbst. Warum wurde die Otto Hahn letztlich als Forschungsschiff aufgegeben und zum konventionellen Schiff umgerüstet?

Die Otto Hahn war eines von 4 zivilen nuklear angetriebenen Schiffen, die bislang die Weltmeere befuhren. Sie wurde 1969 in Dienst gestellt und 1979 außer Dienst gestellt und zum konventionellen Schiff umgerüstet. Der Reaktor der NS Otto Hahn war der Fortschrittliche Druckwasserreaktor. Dieser Druckwasserreaktor war sehr kompakt ausgeführt, so dass die Dampferzeuger in den Reaktordruckbehälter integriert sind. Das Reaktorschutzsystem gleicht dem in konventionellen DWRs, bis auf ein paar Besonderheiten. Die Steuerstäbe fielen nicht nur mit der Schwerkraft in den Reaktor, sondern wurden auch durch eine Feder, die beim Herausfahren der Stäbe zusammengedrückt wurde, in den Reaktor geschossen, womit auch nach dem Kentern ein Abschalten möglich war. Weiterhin bestand die Möglichkeit die Reaktorreaktion mit Meerwasser zu fluten, um eine Notkühlung zu ermöglichen. Leider war das Boriersystem nicht so fortschrittlich. Die Borsäure musste von Hand zugegeben werden und die Säcke mit der Borsäure lagen im Maschinenraum, so dass es zeitlich etwas gedauert hätte bis eine Borierung zum Abschalten bei einem ATWS-Störfall im Reaktor angekommen wäre. Letztlich wurde der nukleare Antrieb aus Kostengründen aufgegeben

---

a) Nennen Sie drei Isotope, die als Spaltstoff eingesetzt werden können, die mit thermischen Neutronen spaltbar sind. (3 Punkte)

U-233; U-235; Pu-239; Pu-241 Andere Isotope sind praktisch irrelevant.

b) Welchen Einfluss hat  $^{135}\text{Xe}$  auf die Reaktorregelung? Zeichnen Sie den qualitativen Verlauf der Xenon-Konzentration bei einem Lastwechsel zu niedrigerer Leistung. Wieso tritt dieser Effekt nicht bei schnellen Reaktoren auf? (4 Punkte)

$\text{Xe-135}$  tritt als Spaltprodukt bei der Kernspaltung auf und hat einen großen thermischen Wirkungsquerschnitt, dadurch vergiftet  $\text{Xe}$  das System und reduziert die Reaktivität als negativer Reaktivitätsbeitrag. Da  $\text{Xe-135}$  selber radioaktiv ist stellt sich bei konstantem Leistungsbetrieb ein Gleichgewicht aus Erzeugung und Zerfall und Neutroneneinfang ein. Allerdings kann es bei Lastwechselbetrieb durch das lokale Verfahren der Steuerstäbe zu einer lokalen Änderung der  $\text{Xe}$ -Konzentration kommen, auf Grund der lokalen Neutronenflussänderungen, die dann zu sogenannten  $\text{Xe}$ -Schwingungen im Reaktor führen.

Bei schnellen Reaktoren tritt der Effekt nicht auf, da der Wirkungsquerschnitt für hohe Neutronenenergien viel kleiner ist und daher einen viel geringeren Reaktivitätsbeitrag hat.

c) Wie kommt es zum Auftreten von verzögerten Neutronen bei der Kernspaltung? Welchen Nutzen haben diese Neutronen für die Reaktorregelung? (4 Punkte)

Bei der Kernspaltung entstehen i.d.R. zwei hochangeregte Kerne als Spaltprodukte. Diese Spaltprodukte sind neutronenreich und zerfallen meist durch beta-Zerfall. Allerdings können einige Isotope auch direkt ein Neutron emittieren, um den Neutronenüberschuss abzubauen. Diese Neutronen werden dann als verzögerte Neutronen bezeichnet und treten mit einer mittleren Halbwertszeit von 13 Sekunden auf. Erst durch diese Neutronen, auch wenn ihr Anteil recht klein ist, ist es möglich einen Reaktor sicher zu betreiben, da mit verzögerten Neutronen der Reaktor langsamer auf Bedieneingriffe reagiert als ohne verzögerte Neutronen. Ohne verzögerte Neutronen bzw. im prompt kritischen Zustand würde sich die Leistung innerhalb von Millisekunden verdoppeln, was regelungstechnisch schwer zu beherrschen ist. Nur dadurch, daß der Reaktor nur verzögert kritisch gefahren wird um die Reaktorleistung zu steigern, ist es möglich Reaktoren sicher zu betreiben.

d) Was verstehen Sie unter dem Temperaturkoeffizienten? (4 Punkte)

Der Temperaturkoeffizient gibt die Änderung der Reaktivität mit der Temperatur an. Insgesamt gibt es zwei große Beträge hierfür: die Änderung der Moderatorichte mit der Temperatur, womit sich die Moderation direkt verändert und die Dopplerverbreiterung der Wirkungsquerschnittsresonanzen, die auch temperaturabhängig ist, da die Resonanzbreite mit steigender Temperatur größer wird, weil sich die Atome bzw. Moleküle bei höheren Temperaturen schneller bewegen.

---

---

In der Zukunft werden irgendwann eventuell mal Fusionsreaktoren für die Energieversorgung zur Verfügung stehen. Was sind die Herausforderungen für die Nutzung der Fusion und wie sehen aktuell die Lösungsansätze dafür aus?

Coulomb-Barriere von 0,1 MeV => hohe Temperaturen benötigt  
Hohe Temperaturen => Isolation des Plasmas durch Magnete  
Konventionelle Magnete unbrauchbar => Supraleitende Magnete  
Plasmaheizung => Gyrotrons und Neutralteilcheneinschuss  
Plasmareinigung => Divertorentwicklungen  
Brennstoff nicht natürlich vorhanden => Einsatz von Lithium-Brutblanket  
Neutronen-Brut-Bilanz => Neutronenervielfacher benötigt (Be)  
Hohes Aktivierungspotential => Entwicklung von RAFM-Stählen usw.  
Hohe DPA-Raten in der ersten Wand => Einsatz von Wolfram oder Kohlenstoff  
Instationärer Betrieb beim TOKAMAK => Stellarator-Entwicklung + mgl. Pulsbetrieb usw.

---

---

Absorber:

Gadolinium, Bor, Indium, Cadmium, Silber

Moderator:

H<sub>2</sub>O, D<sub>2</sub>O, Grafit, Beryllium

---

---

Was versteht man unter dem logarithmischen Energiedekrement? (4 Punkte)

Das logarithmische Energiedekrement ist die mittlere Lethargiezunahme pro Bremsstoß.  $u$

Die Lethargie ist definiert durch:  $u = \ln \frac{E}{E'}$

---

---

**Erklären Sie die Nachteile des Abschaltsystems eines RBMK-Reaktors in ihrer ursprünglichen Ausführung!**

Zum einen konnten die Steuerstäbe nur langsam in den Reaktor eingefahren werden; eine Schnellabschaltung war nicht möglich.  
Zum anderen war an der Unterseite des Absorberstabes ein Stück Grafit angebracht. Wurde der Stab aus komplett ausgefahrener Position eingeschoben, so wurde dadurch das Grafitstück in Bereiche höheren Neutronenflusses bewegt, wo es weniger gut moderierendes Leichtwasser verdrängt. Dadurch hatte das Einfahren des Steuerstabes zunächst einen positiven Einfluss auf die Reaktivität.  
Anschaulich betrachtet kann man sich somit den Tschernobyl-Reaktor als ein Auto vorstellen, bei dem das Betätigen des Bremspedals zunächst eine Beschleunigung zur Folge hat.

---

**Warum sollen für den Reaktordruckbehälter möglichst cobaltfreie Stähle verwendet werden? (2 Punkte)**

Auch bei geringem Cobaltgehalt kommt es zu einer starken Aktivierung des RDB durch die oben beschriebene Reaktion. Dies stellt zum einen eine Herausforderung beim Rückbau der Anlage dar. Zum Anderen werden die obersten Schichten der Primärkreisplattierung als Korrosionsprodukt gelöst, was zu einer Kontamination des Kühlmittels führt, wenn sie aktivierbares Cobalt enthalten.

---

Welche Eigenschaften sollte ein Moderator erfüllen? (4 Punkte)

- Geringe Absorption
  - Niedrige Atommasse
- 

minore Aktiniden: Elemente mit höheren Ordnungszahlen als der des Plutoniums  
Entstehung im Reaktor durch sukzessiven Neutroneneinfang und Beta--Zerfall ausgehend vom Plutonium

b) 6 Punkte

Minore Aktiniden sind eine besondere Herausforderung für die Endlagerfrage. Deshalb ist es vorteilhaft, sie bei der Wiederaufbereitung zu separieren (Partitioning) und in einem speziellen Reaktor durch Spaltung zu zerstören (Transmutation). Da minore Aktiniden zum einen für die Spaltung hohe Neutronenenergien benötigen und zum anderen negative Auswirkungen auf die Sicherheitseigenschaften eines konventionellen Reaktors hätten (geringer Anteil verzögerter Neutronen), ist es vorgesehen, für die Transmutation ein unterkritisches System mit einer zusätzlichen Neutronenquelle zu verwenden.

Als Neutronenquelle dient die Spallation von z.B. Blei-Kernen mit hochenergetischen Protonen (ca. 1,5 GeV), die mit einem Linearbeschleuniger bereitgestellt werden.

---

**Wie unterscheiden sich ein Salzstock und eine Granitformation im Bezug auf die Eignung als Endlager für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle?**

Salzstock: Bessere Wärmeleitfähigkeit; plastisches Gestein „Umfließen“ der Abfälle, somit keine Rückholbarkeit; Salzformation ist wasserfrei, allerdings im Fall eines hypothetischen Wassereintruchs Auflösung des Salzes; auf Grund der Analyse der vergangenen Entwicklung ist jedoch von einer langfristigen geologischen Stabilität auszugehen.

Granit: Schlechtere Wärmeleitfähigkeit, Gestein behält Struktur Rückholbarkeit gewährleistet; Gestein kann durch Risse Wasser führen, was die Anforderungen an die technischen Barrieren erhöht, aber nicht die Integrität des Gesteins gefährdet

---

---

g) Warum sind die thermischen Wirkungsquerschnitte in Leistungsreaktoren generell kleiner als in Forschungsreaktoren, die bei nahezu Raumtemperatur betrieben

**SS 2010**

werden? Was folgt daraus für den thermischen Neutronenfluss bei gleicher Leistung? (3 Punkte)

Auf Grund der höheren Betriebstemperatur ist bei Leistungsreaktoren das thermische Neutronenspektrum im Vergleich zu Nullleistungsreaktoren zu höheren Energien verschoben. Da die mikroskopischen Wirkungsquerschnitte im thermischen Energiebereich mit einem  $1/v$ -Verlauf approximiert werden können, führt eine höhere Betriebstemperatur somit zu niedrigeren thermischen Wirkungsquerschnitten. Da die Leistung proportional zur Reaktionsrate ist und diese gleich dem Produkt aus Neutronenfluss und makroskopischem Wirkungsquerschnitt ist, führt eine Absenkung des thermischen Wirkungsquerschnittes bei gleichbleibender Leistung zu einem Anstieg des thermischen Neutronenflusses.

h) Wie wird der Neutronenfluss bei Leistungsreaktoren bestimmt? (2 Punkte)  
Spaltkammern, Kleinkugelmesssystem

---

---

a) Nennen Sie drei Isotope, die als Spaltstoff eingesetzt werden können, die mit thermischen Neutronen spaltbar sind. (3 Punkte)

U-233; U-235; Pu-239; Pu-241 Andere Isotope sind praktisch irrelevant.

b) Welchen Einfluss hat  $^{135}\text{Xe}$  auf die Reaktorregelung? Zeichnen Sie den qualitativen Verlauf der Xenon-Konzentration bei einem Lastwechsel zu niedrigerer Leistung. Wieso tritt dieser Effekt nicht bei schnellen Reaktoren auf? (4 Punkte)

$\text{Xe-135}$  tritt als Spaltprodukt bei der Kernspaltung auf und hat einen großen thermischen Wirkungsquerschnitt, dadurch vergiftet  $\text{Xe}$  das System und reduziert die Reaktivität als negativer Reaktivitätsbeitrag. Da  $\text{Xe-135}$  selber radioaktiv ist stellt sich bei konstantem Leistungsbetrieb ein Gleichgewicht aus Erzeugung und Zerfall und Neutroneneinfang ein. Allerdings kann es bei Lastwechselbetrieb durch das lokale Verfahren der Steuerstäbe zu einer lokalen Änderung der  $\text{Xe}$ -Konzentration kommen, auf Grund der lokalen Neutronenflussänderungen, die dann zu sogenannten  $\text{Xe}$ -Schwingungen im Reaktor führen.

Bei schnellen Reaktoren tritt der Effekt nicht auf, da der Wirkungsquerschnitt für hohe Neutronenenergien viel kleiner ist und daher einen viel geringeren Reaktivitätsbeitrag hat.

c) Wie kommt es zum Auftreten von verzögerten Neutronen bei der Kernspaltung? Welchen Nutzen haben diese Neutronen für die Reaktorregelung? (4 Punkte)

Bei der Kernspaltung entstehen i.d.R. zwei hochangeregte Kerne als Spaltprodukte. Diese Spaltprodukte sind zu neutronenreich und zerfallen meist durch  $\beta$ -Zerfall. Allerdings können einige Isotope auch direkt ein Neutron emittieren, um den Neutronenüberschuss abzubauen. Diese Neutronen werden dann als verzögerte Neutronen bezeichnet und treten mit einer mittleren Halbwertszeit von 13 Sekunden auf. Erst durch diese Neutronen, auch wenn ihr Anteil recht klein ist, ist es möglich einen Reaktor sicher zu betreiben, da mit verzögerten Neutronen der Reaktor langsamer auf Bedieneingriffe reagiert als ohne verzögerte Neutronen. Ohne verzögerte Neutronen bzw. im prompt kritischen Zustand würde sich die Leistung innerhalb von Millisekunden verdoppeln, was regelungstechnisch schwer zu beherrschen ist. Nur dadurch, daß der Reaktor nur verzögert kritisch gefahren wird um die Reaktorleistung zu steigern, ist es möglich Reaktoren sicher zu betreiben.

d) Was verstehen Sie unter dem Temperaturkoeffizienten? (4 Punkte)

Der Temperaturkoeffizient gibt die Änderung der Reaktivität mit der Temperatur an. Insgesamt gibt es zwei große Beträge hierfür: die Änderung der Moderatorichte mit der Temperatur, womit sich die Moderation direkt verändert und die Dopplerverbreiterung der Wirkungsquerschnittsresonanzen, die auch temperaturabhängig ist, da die Resonanzbreite mit steigender Temperatur größer wird, weil sich die Atome bzw. Moleküle bei höheren Temperaturen schneller bewegen.

---

---

a) Warum muss bei einem Leichtwasserreaktor der Reaktorkern, auch wenn keine Kernspaltungen stattfinden, immer mit Wasser bedeckt sein? Mit welchen Maßnahmen wird dies sichergestellt? (4 Punkte)

Durch den radioaktiven Zerfall der Spaltprodukte entsteht Nachzerfallswärme, die abgeführt werden muss.

Durch die redundanten Notkühlsysteme wird zum Einen ein Ersatz für im Fall eines Kühlmittelverluststörfalls ausgetretenes Wasser bereitgestellt. Zum Anderen wird die durch das Wasser abgeführte Wärme über Wärmetauscher an die Umgebung abgegeben, so dass permanent eine adäquate Wärmesenke vorhanden ist.

b) Was geschieht bei einem Versagen aller in a) genannten Systeme? Wie wird selbst in diesem Fall ein Schutz der Umgebung gewährleistet. (4 Punkte)

Wenn die Nachzerfallswärme nicht abgeführt wird, kommt es zum Überhitzen und Schmelzen der Brennstäbe. Hierbei werden leichtflüchtige Spaltprodukte in die Containmentatmosphäre freigesetzt. Das Corium kann bei dauerhafter Nichtverfügbarkeit der Kühlung den RDB durchschmelzen und reagiert dann mit dem Beton des Gebäudefundamentes.

Durch das gasdichte Containment ist gewährleistet, dass die Radionuklide auch bei einem solchen schweren Störfall nicht in die Umgebung gelangen. Der Schutz der Containmentintegrität hat daher bei solchen Ereignisabläufen eine extrem hohe Bedeutung.

c) Welche Eigenschaften sollte das Kühlmittel

i) bei einem thermischen

ii) bei einem schnellen Reaktor

aufweisen? Nennen Sie jeweils zwei geeignete Stoffe! (6 Punkte)

Generell: niedrige Neutronenabsorption, hohe Wärmeleitfähigkeit, hohe Wärmekapazität, niedrige Viskosität, Strahlenbeständigkeit, chemische Stabilität, geringer Preis

thermischer Reaktor: gute Moderationseigenschaften

schneller Reaktor: möglichst schlechte Moderationseigenschaften; auf Grund der hohen Leistungsdichte kommt einer möglichst guten Wärmeabfuhr eine besondere Bedeutung zu

d) Nennen Sie einen typischen Wert für: (4 Punkte)

i) den Massenstrom durch eine Hauptkühlmittelpumpe eines DWR  
5000 kg/s

ii) den Durchmesser des Reaktordruckbehälters eines DWR  
d=5m

iii) die Umdrehungen / Minute der Niederdruckturbine

f=1500 / min

iv) den heutzutage erreichbaren Abbrand von DWR-Brennelementen

b=60000 MWd/t

**Zusatzfrage RT II (10 Punkte)**

**Wie kann bei schweren Störfällen in Kernkraftwerken Wasserstoff entstehen, welche Gefahr geht hiervon aus und welche Gegenmaßnahmen werden getroffen?**

Wenn sich durch den Ausfall der Kernkühlung der Brennstoff überhitzt, wird das Zirkonium der Hüllrohre durch Wasserdampf oxidiert und es bildet sich Wasserstoff gemäß der Reaktionsgleichung:



Wasserstoff bildet über weite Konzentrationsbereiche explosions- oder sogar detonationsfähige Gemische mit Luft. Damit besteht die Gefahr, dass durch Wasserstoffverbrennungen im Containment dieses geschädigt werden kann.

Um dieser Gefahr zu begegnen, wurden in deutschen Druckwasserreaktoren passive autokatalytische Rekombinatoren nachgerüstet. Sie enthalten an einer großen inneren Oberfläche einen Platin / Palladiumkatalysator, an dem der Wasserstoff unterhalb der Zündtemperatur mit dem Luftsauerstoff zu Wasser reagiert. Durch die exotherme Reaktion erwärmt sich das Gasgemisch, so dass sich im Rekombinator eine Naturkonvektion (Kamineffekt) einstellt, durch die eine passive Durchströmung

---

Nennen Sie jeweils 5 sicherheitstechnisch relevante Gemeinsamkeiten und Unterschiede des European Pressurized Water Reactor (EPR) und den deutschen

DWR der Konvoi-Bauart.

Gemeinsamkeiten:

- 4-fach redundante Not- und Nachkühlsysteme
- Notstromdiesel
- negativer Temperatur-/Voidkoeffizient
- Schutz vor äußeren Einwirkungen durch Verbunkerung und andere

Maßnahmen

- Redundante und diversität Abschaltsysteme

...

Unterschiede:

- Core-Catcher beim EPR
- keine Notwendigkeit der Umschaltung von Flutbehältern auf Sumpfumwälzung beim EPR
- BE-Lagerbecken beim EPR außerhalb des Containments
- zweischaliges Containment beim EPR
- EPR-Containment: vorgespannter Beton mit Liner
- konsequentere räumliche Trennung sicherheitsrelevanter Systeme beim EPR

---

---

### **Erläutern Sie stichpunktartig Ursachen und Ablauf des Störfalls von Three Mile Island!**

Ausfall der Kondensatpumpen; als Folge davon Ausfall der Hauptspeisewasserpumpen und Turbinenschnellabschaltung. Start der Notspeisewasserpumpen

- Druckanstieg Primärkreis, nach 3 Sek Ansprechen Druckhalterabblaseventil
- Reaktorschnellabschaltung

Druckhalterabblaseventil versagt in „offen“ Stellung Leckage im Primärkreis; nach dem Ansprechen der Berstscheibe im Abblasebehälter Freisetzungen ins Containment

Durch Fehler der Operatoren ist für mehrere Stunden keine ausreichende Kernkühlung gewährleistet, es kommt zu einem partiellen Kernschmelzen

Die Integrität des Containments bleibt erhalten; es kommt zu keiner signifikanten Aktivitätsfreisetzung in die Umwelt

Fehler der Operatoren:

Armaturen für Notspeisewasserpumpen waren irrtümlich in den ersten 15 Min des Unfalls geschlossen

Leckage am Druckhalterabblaseventil wurde erst nach über 2 Stunden bemerkt und mittels Absperrventil behoben

Fehlerhafte Beurteilung des Anlagenzustandes (Wasser-Dampf-Gemisch RDB) Abschalten der Hauptkühlmittelpumpen verursacht unzureichende Kernkühlung

---

---