
Reaktorsicherheit

Vortrag im Seminar Kernenergie

Julia Thaele
Technische Universität Dortmund
08. Januar 2010

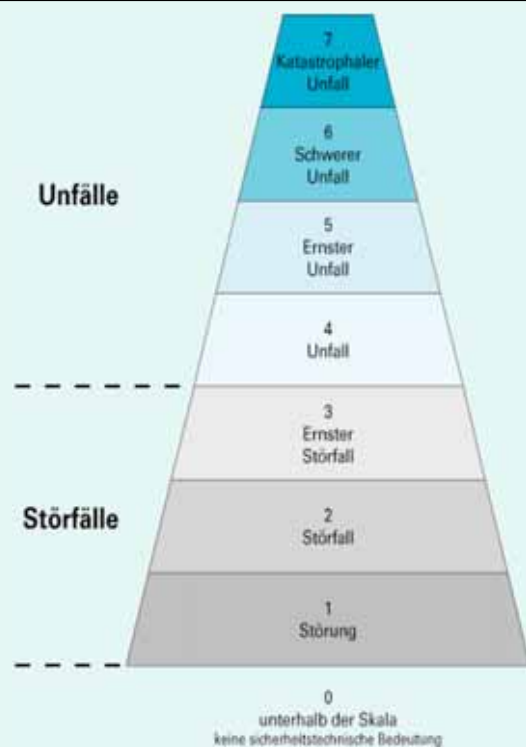
Gliederung

- **Übersicht**
 1. Gefahren im AKW
 2. Störfälle
 3. Unfälle
 4. Kernschmelze
 5. Meldepflicht
- **Sicherheitssysteme**
 1. Sicherheitsanforderungen an ein AKW
 2. Das mehrstufige Schutzkonzept
 3. Sicherheitstechnische Einrichtungen
 1. Passive Sicherheitseinrichtungen
 2. Aktive Sicherheitseinrichtungen
 4. Inhärente Sicherheit
 5. Sicherheitsrisiko Mensch
- **Stör- und Unfälle**
 1. Deutsche Störfälle
 2. Three Mile Island
 3. Tschernobyl
- **Brennstoffkreislauf**
 1. Transport von Atommüll
- **Ausblick auf neue Sicherheitssysteme**
- **Zusammenfassung**

Übersicht

Übersicht: Gefahren im AKW

- **INES**
(International Nuclear Event Scale)
- 1. Anomalität: technisches Versagen, Bedienfehler, falsche Ablaufplanung
- 2. Versagen einiger Sicherheitseinrichtungen
- 3. Freisetzung v. wenig radioaktivem Material außerhalb der Anlage
- 4. Deutlicher Schaden in Anlage; teilweise Kernschmelze
- 5. Schlimme Schäden in Anlage; Feuer u. Explosion, einige Notfallpläne werden aktiviert
- 6. Notfallpläne des Landes greifen
- 7. Gesundheitliche Beeinträchtigung in mehreren Ländern



Übersicht: Störfälle

- Störfall: „Ereignisablauf, bei dessen Eintreten der Betrieb der Anlage oder die Tätigkeit aus sicherheitstechnischen Gründen nicht fortgeführt werden kann und für den die Anlage auszulegen ist oder für den bei der Tätigkeit vorsorglich Schutzvorkehrungen vorzusehen sind...“
- Es gibt zwei Klassen von Störfällen:
 - Betriebsstörungen
 - Auslegungsstörfälle
- Betriebsstörungen sind kleinere Störungen, die während des Betriebes behoben werden können
- Auslegungsstörfälle sind ernsthafte Schäden am Kraftwerk

Übersicht: Unfälle

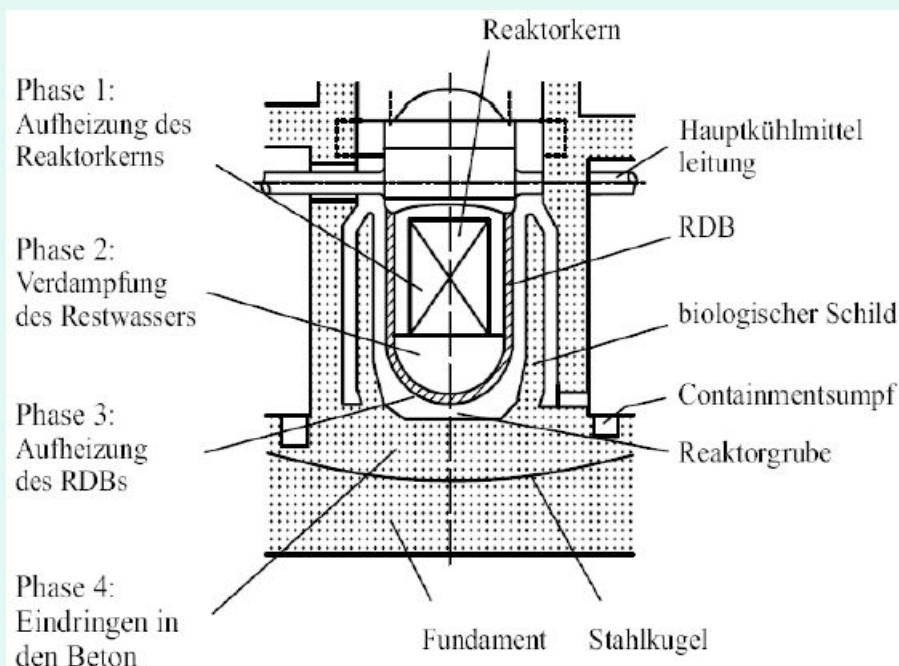
- Unfälle: Große bis in andere Länder reichende Freisetzung von radioaktivem Material, das zu gesundheitlicher Schädigung von Arbeitspersonal und Bevölkerung führen kann
- GAU (Größter Anzunehmender Unfall): Kernschmelze
- Es existieren drei Arten von Kernschmelzen:
 1. Kernschmelze unter niedrigem Druck (ND)
 2. Kernschmelze unter hohem Druck (HD)
 3. Kernschmelze aufgrund von Dampferzeugerheizrohrleck

Übersicht: Kernschmelze

- **ND-Fall:** Kühlmittelverluststörfall
Nach einem Kühlmittelverlust versagt die Notkühlkette und der Kern schmilzt unter niedrigem Druck
- **HD-Fall:** Transientenstörfall
Über ein kleines Leck entweicht Kühlmittel ☒ Wärmeabfuhr über Dampferzeuger fällt aus ☒ Reaktor bleibt unter hohem Druck ☒ geschmolzener Kern und Knallgasexplosion verursachen schweren Schaden am Containment
- **Dampferzeugerheizrohrleck:**
☒ Überspeisung von Dampferzeuger
☒ Kernkühlung nur solange der Wasservorrat reicht

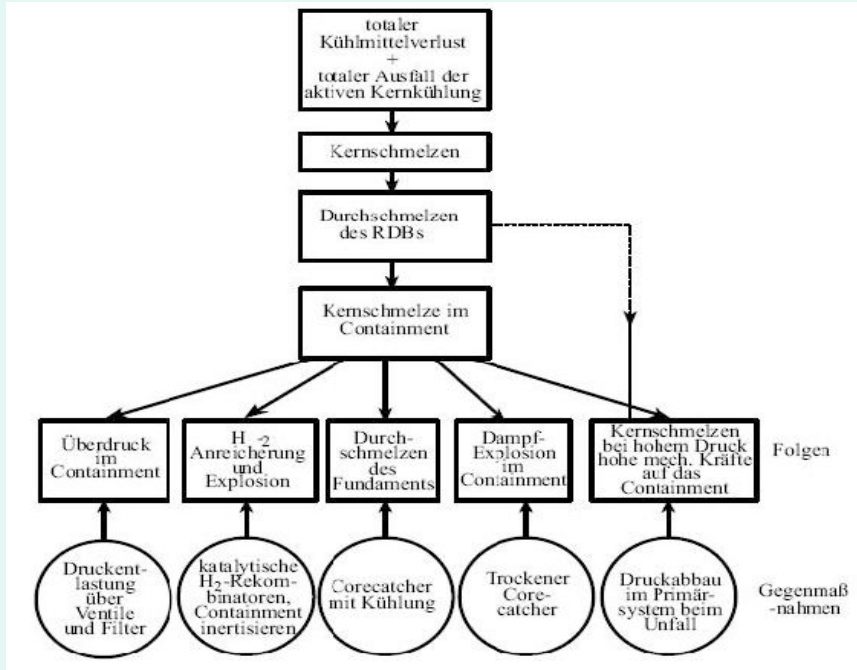
Kernschmelzunfall	Beginn Kernschmelzen (min)	Versagen Reaktordruckbehälter (min)
Kernschmelzen ND	55	120
Kernschmelzen HD	110	140
Kernschmelzen ND nach Druckentlastung des RKK	330	410
Kernschmelzen nach - nicht beherrschtem DE-Heizrohrleck (12 cm ²) nach Druckentlastung des RKK	540	710
- nicht beherrschtem Bruch einer Nachkühlleitung im Ringraum	80	140

Übersicht: Kernschmelze (ND)



- Grundwasserverseuchung nach Kernschmelze nach ungefähr 4 Tagen

Übersicht: Kernschmelze



Schematische Übersicht der Folgen von Kernschmelzunfällen sowie deren Gegenmaßnahmen

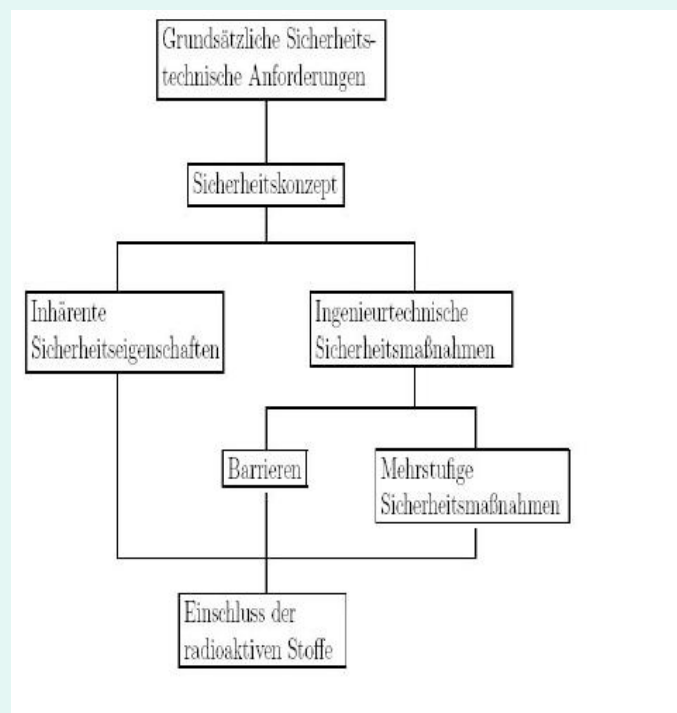
Übersicht: Meldepflicht

Kategorie	Meldefrist
Kategorie S	Sofortmeldung - Meldefrist unverzüglich Der Kategorie S sind solche Ereignisse zuzuordnen, die der Aufsichtsbehörde sofort gemeldet werden müssen, damit sie gegebenenfalls in kürzester Frist Prüfungen einleiten oder Maßnahmen veranlassen kann. Hierunter fallen auch Ereignisse, die akute sicherheitstechnische Mängel aufzeigen.
Kategorie E	Eilmeldung - Meldefrist innerhalb von 24 Stunden Der Kategorie E sind solche Ereignisse zuzuordnen, die zwar keine Sofortmaßnahmen der Aufsichtsbehörde verlangen, deren Ursache aber aus Sicherheitsgründen geklärt und in angemessener Frist behoben werden muss. Dies sind z.B. Ereignisse, die sicherheitstechnisch potenziell - aber nicht unmittelbar - signifikant sind.
Kategorie N	Normalmeldung -? Meldefrist innerhalb von 5 Tagen Der Kategorie N sind Ereignisse von untergeordneter sicherheitstechnischer Bedeutung zuzuordnen. Diese Ereignisse gehen im allgemeinen nur wenig über routinemäßige betriebstechnische Ereignisse hinaus. Sie werden erfasst und ausgewertet, um eventuelle Schwachstellen bereits im Vorfeld zu erkennen.
Kategorie V	Vor der Beladung des Reaktors mit Brennelementen - Meldefrist innerhalb von 10 Tagen Der Kategorie V sind alle meldepflichtigen Ereignisse während der Errichtung eines Kernkraftwerkes zuzuordnen, über die die Aufsichtsbehörde im Hinblick auf den späteren sicheren Betrieb der Anlage informiert werden muss
Quelle: Bundesamt für Strahlenschutz (BfS)	

Sicherheitssysteme

Sicherheitssysteme: Sicherheitsanforderungen an ein AKW

- Oberstes Ziel: Schutz der Bevölkerung und des Kraftwerkspersonals vor radioaktiven Stoffen
- Es gibt vier Schutzziele:
 1. Sichere Abschaltung des Reaktors
 2. Sichere Wärmeabfuhr aus dem Reaktorkern
 3. Sicherer Einschluss der radioaktiven Stoffe
 4. Sicherer Schutz der Anlage vor Einwirkungen von Außen
- Zusammen mit oberstem Sicherheitsziel bilden die Schutzziele das Schutzzielkonzept der Reaktorsicherheit



Sicherheitssysteme: Das mehrstufige Schutzkonzept

Ebene 4	Unfall	Ziel: a: Beherrschung seltener Ereignisse; b: Vermeidung von Kernschäden; c: Schadensminderung bei Kernschäden
		Schutzmaßnahme: Spezielle Maßnahmen Maßnahmen des anlageninternen Notfallschutzes
Ebene 3	Störfall	Ziel: Beherrschung von Auslegungsstörfällen
		Schutzmaßnahme: Inhärent sicheres Anlagenverhalten und Sicherheitssysteme
Ebene 2	Störung	Ziel: Verhinderung von Störfällen
		Schutzmaßnahme: Inhärent sicheres Anlagenverhalten und technische Einrichtungen, zum Beispiel Begrenzungseinrichtungen
Ebene 1	Normal- betrieb	Ziel: Verhinderung von Betriebsstörungen und Minimierung der Abgaben radioaktiver Stoffe
		Schutzmaßnahme: Hohe Qualität technischer Einrichtungen und der betrieb- lichen Abläufe sowie sicherheitsbezogenes Handeln

- Gestaltung durch ein System von gestaffelten Sicherheitsmaßnahmen, die die Schutzziele einhalten sollen. Die Ebenen werden nacheinander wirksam.

Sicherheitssysteme: Das mehrstufige Schutzkonzept

- Das mehrstufige Schutzkonzept besteht aus mehreren Leitideen
- **Qualitätssicherung:** Kontrollen bei Auswahl und Verarbeitung von Werkstoffen
- **Diversität:** Gleichartige Sicherheitssysteme durch technisch unterschiedliche Einrichtungen
- **Fail-Safe:** Reaktoranlage wird bei Ausfall automatisch in sicheren Zustand überführt
- **Konservative Auslegung:** Systeme sollen im Alltagsbetrieb mehr verkraften, als nötig ist
- **Automatische Leittechnik:** Sicherheitssystem arbeitet selbstständig und kontrolliert sich
- **Entmaschung:** Sicherheitssysteme besitzen keine gemeinsamen Komponenten und sind räumlich getrennt
- **Redundanz:** Es sind mindestens 2 Sicherheitssysteme mehr vorhanden, als für eigentliche Funktion nötig ist

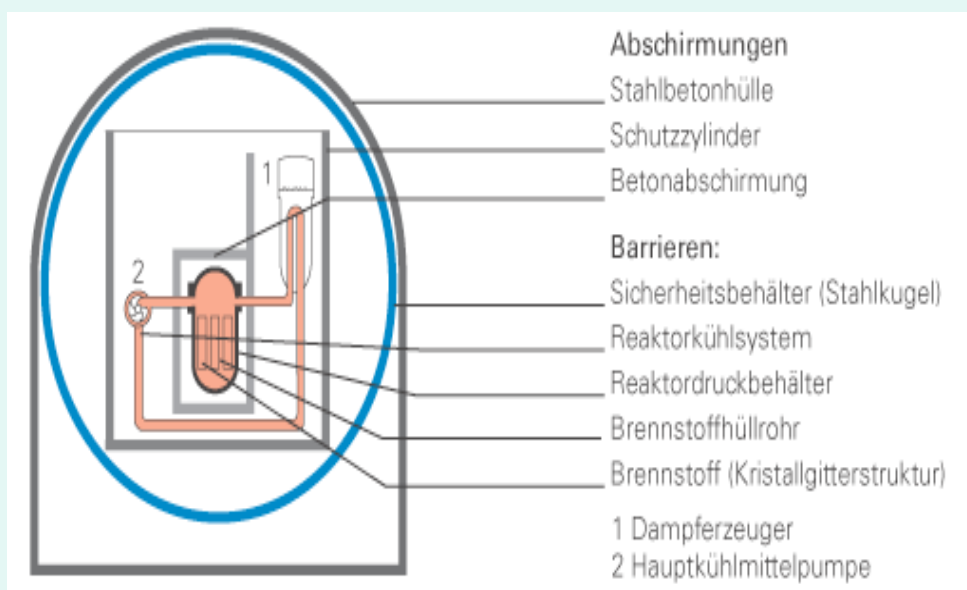


Sicherheitssysteme: Das mehrstufige Schutzkonzept

- Schutzzielkonzept wird durch gestaffeltes Schutzkonzept erreicht
 - Wichtigstes Ziel hierbei: Einschließen der radioaktiven Stoffe durch mehrstufige Barrieren
 - Diese Nukleartechnischen Barrieren besitzt jedes AKW unabhängig von seiner Bauart
 - Die Barrieren können durch vielfältige Arten gefährdet werden, darum werden sie von umfangreichen Sicherheitsmaßnahmen geschützt
- ☒ mehrstufiges Schutzkonzept („defense-in-depth“)

Sicherheitssysteme: Sicherheitstechnische Einrichtungen Passive Sicherheitseinrichtungen

- Das Matroschka-Prinzip: Der Kernbrennstoff ist im Kernkraftwerk in mehrere „Hüllen“ eingepackt

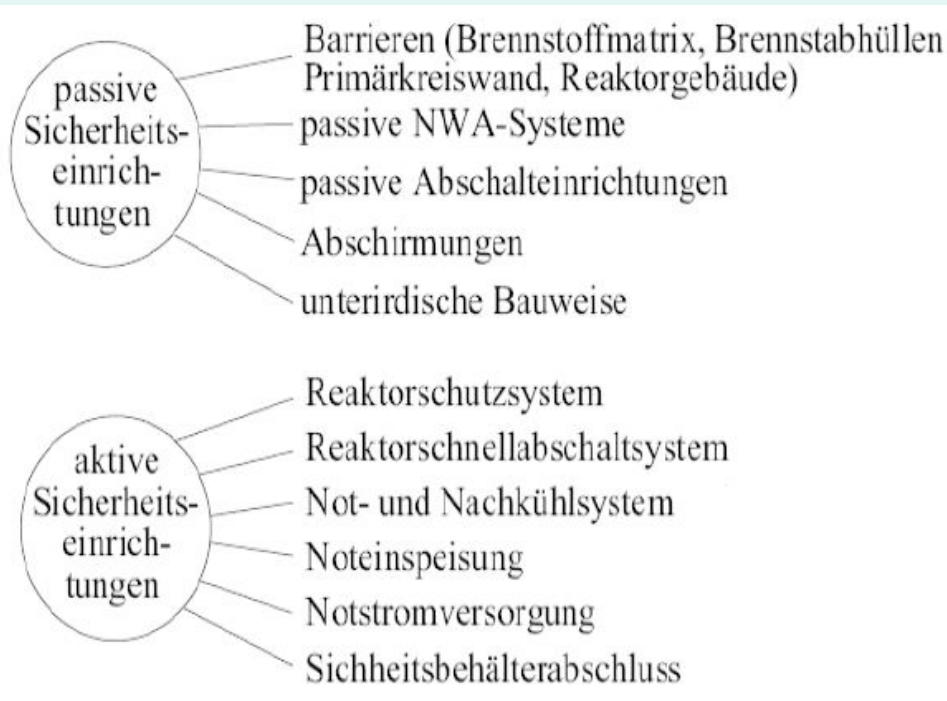


Sicherheitssysteme: Sicherheitstechnische Einrichtungen

Passive Sicherheitseinrichtungen

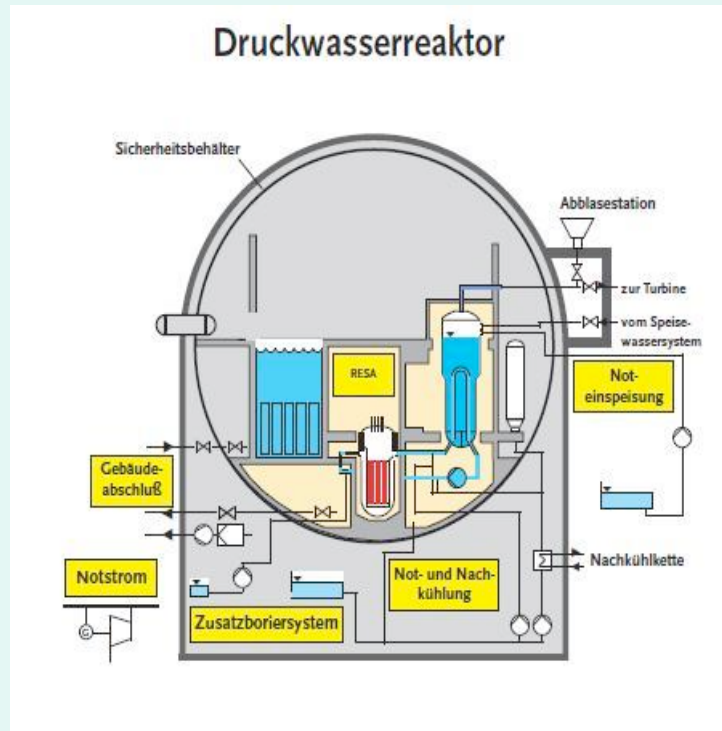
- Das Kristallgitter des Brennstoffs in den Brennstäben hält die radioaktiven Elemente zusammen
- Die Brennstäbe sind so gasdicht, dass radioaktive Gase kaum entweichen können
- Die Brennelemente stehen in Wasser, welches α - und β -Strahlung abschirmt
- Dies alles umgibt der Reaktordruckbehälter, der die γ -Strahlung abschirmt
- Darüber existiert eine Betonschicht, die der Sicherheitsbehälter einhüllt
- Letztlich liegt über alledem die Stahlbetonkuppel zum Schutz vor äußeren Einwirkungen

Sicherheitssysteme: Sicherheitstechnische Einrichtungen



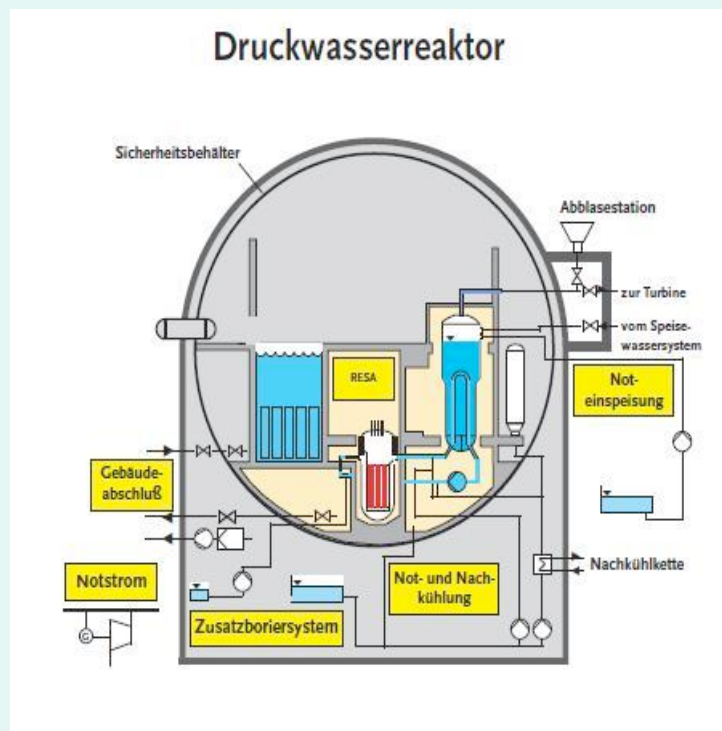
Sicherheitssysteme: Sicherheitstechnische Einrichtungen Aktive Sicherheitseinrichtungen

- **Reaktorschutzsystem:** Erfasst sicherheitsrelevante Messdaten und leitet beim Erreichen von Grenzwerten Sicherheitsmaßnahmen ein
- **Reaktorschnellabschaltung (RESA):** Unterbricht die Kettenreaktion Nur noch Nachzerfallswärme im Kern
- **Notstromsystem:** Springt im Stromausfall an und versorgt alle sicherheitsrelevanten Komponenten mit Strom
- **Not- und Nachkühlsystem:** Führt die Nachzerfallswärme ab und ersetzt bei Kühlmittelverlust das ausströmende Wasser im Reaktorkühlkreislauf



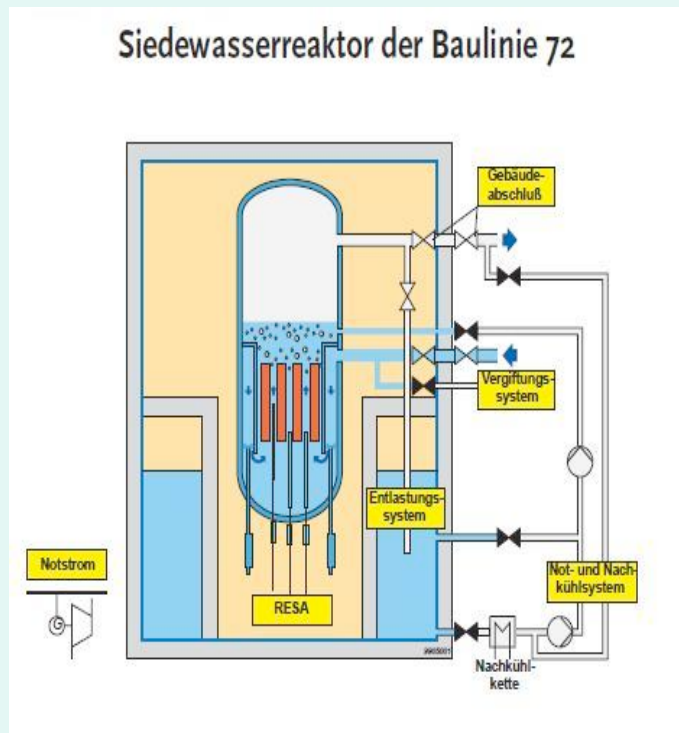
Sicherheitssysteme: Sicherheitstechnische Einrichtungen Aktive Sicherheitseinrichtungen

- **Noteinspeisesystem:** Abtransport der Wärme aus den Dampferzeugern, wenn Hauptspeisewassersystem nicht zur Verfügung steht
- **Gebäudeabschlusssystem:** In Störfällen, in denen radioaktive Stoffe freigesetzt werden können, riegelt es den Sicherheitsbehälter durch Ventile und Lüftungsclappen hermetisch von der Außenatmosphäre ab
- **Zusatzboriersystem:** Ergänzt Kühlmittel bei äußeren Einwirkungen, wird beim Dampferzeugerheizrohrleck benötigt und kann den Reaktor durch Borsäureeinspeisung abschalten



Sicherheitssysteme: Sicherheitstechnische Einrichtungen Aktive Sicherheitseinrichtungen

- Unterschiede zum DWR
- **Entlastungssystem:**
Druckentlastung des Reaktordruckbehälters bei Störfällen, wenn der Turbinenkondensator für die Dampfentnahme nicht mehr zur Verfügung steht. Dazu wird nach Öffnen von Ventilen der Dampf in eine Wasservorlage abgeblasen und kondensiert dort. Die Wasservorlage wird über das Not- und Nachkühlsystem gekühlt. Die Ventile des Entlastungssystems nehmen zusätzlich die Funktion von Sicherheitsventilen wahr.
- **Vergiftungssystem:** soll bei Ausfall des Abschaltsystems den Reaktor durch Einspeisen von Borsäure abschalten



Sicherheitssysteme: Inhärente Sicherheit

- **Inhärente Sicherheit:** Eigenschaft einer Reaktoranlage, Schutzziele allein aufgrund von physikalischen Effekten und ohne spezielle Schutzaktionen zu erreichen.
- Man unterscheidet dabei
 - **Physikalisch inhärente Sicherheit:** Wenn aus physikalischen Effekten ein Unfall mit großem Schadensausmaß nicht möglich ist, z.B. LWR realisieren dies durch negativen Temperaturkoeffizienten
 - **Technisch inhärente Sicherheit:** Wenn sich ein System so verhält, dass es zu keinem großen Schadensausmaß kommt, auch wenn technische Einrichtungen versagen ☒ LWR NICHT technisch inhärent sicher.
Aber: HTR können sowohl technisch als auch physikalisch inhärent sicher konstruiert werden ☒ fällt der Kühlkreislauf aus, wird die im Reaktorkern erzeugte Wärme an die Umgebung abgegeben

Sicherheitsrisiko Mensch

- Voraussetzung: Kraftwerkspersonal muss hoch qualifiziert sein und wird regelmäßig weitergebildet ca. 70 % der Belegschaft nimmt jedes Jahr an Weiterbildungen teil
- Schichtleiter, Reaktor- und Turbinenfahrer verbringen ca. 15 % ihrer Arbeitszeit mit Simulationen
- Übungen im Simulatorzentrum: 16 deutsche und niederländische Anlagen sind detailgetreu nachgebaut; ein gläsernes DWR-Modell erlaubt es die komplizierten Vorgänge im Inneren darzustellen
- Simuliert werden nicht nur Standardsituationen, sondern auch Störfälle. Dabei werden auch insbesondere technische Abläufe und Kommunikationsverhalten des Personals geprüft
- Psychologische Spezialtrainings für jeden Mitarbeiter: deutsche Schichtmannschaften müssen sich alle 2 bis 3 Jahre diesen Tests unterziehen

Stör- und Unfälle

Stör- und Unfälle: Deutsche Störfälle

- **13. Januar 1977: Grundremmingen**
 - Wettertechnisch bedingt traten an Hochspannungsleitungen Kurzschlüsse auf ☒ RESA wurde aktiviert, doch es kam zu Fehlsteuerungen, nach 10 Minuten stand im Block A das radioaktive Wasser 3m hoch und war ca. 80° C heiß
- **18. Juni 1978: Brunsbüttel**
 - Durch Abriss eines Blindstutzens traten 2 Tonnen radioaktiver Dampf in das Maschinengebäude und später durch Dachklappen ins Freie
- **4. Mai 1986: Hamm-Uentrop, THTR**
 - Zerbrochene Kugelbrennelemente verstopften Rohre ☒ durch Versuch mit hohem Druck Verstopfung zu lösen, zerbrachen Brennelemente und radioaktive Aerosole traten aus
- **16. Dezember 1987: Biblis A**
 - Beim Anfahren klemmte ein Ventil, welches eine unter hohem Druck stehende Leitung abschließt ☒ erst nach 15 min nahm man die Warnleuchte wahr, versuchte das Ventil zu durchspülen, es klemmte aber immer noch, zusätzlich liefen 107 L radioaktive Kühlwasser in den Ringraum ☒ INES Stufe 1

Stör- und Unfälle: Deutsche Störfälle

- **14. Dezember 2001: Brunsbüttel**
 - Wasserstoffexplosion in der Nähe des Reaktordruckbehälters ☒ Zuleitung der Reaktordeckelkühlung riss dabei 2 bis 3m auf. Der Vorfall wurde vom Betreiber verschleiert, denn er hätte den Reaktor herunterfahren müssen ☒ zum Winter hätte er für mehrere Millionen Euro Ersatzstrom kaufen müssen
- **8. Februar 2004: Biblis**
 - Durch Kurzschluss in Hochspannungsleitungen fielen 5 Stromversorgungssysteme aus, aber der Notstromdiesel sprang an
- **27. Juli 2004: Neckarwestheim**
 - Durch menschliches Versagen gelangte mit 2 MegaBq kontaminiertes Wasser in den Neckar ☒ 25.000 € Strafe
- **28. Juni 2007: Krümmel**
 - Durch einen Kurzschluss brannte Transformatorenöl, konnte jedoch ohne Verletzte gelöscht werden

Stör- und Unfälle: Three Mile Island



Stör- und Unfälle: Three Mile Island

- Das KKW Three Mile Island liegt nahe der Stadt Harrisburg im Bundesstaat Pennsylvania, USA
- Es besteht aus zwei Druckwasserreaktorblöcken
- Am 28. März 1979 ereignete sich dort ein ernster Unfall ☒ INES Stufe 5
- Es kam im Block 2 zu einer partiellen Kernschmelze
- Ungefähr 1/3 des Reaktorkerns schmolz
- Reaktorkern verblieb aber im Reaktordruckbehälter ☒ radiologische Belastung des Kraftwerkspersonals und der Bevölkerung blieb niedrig



Stör- und Unfälle: Three Mile Island

- **Unfallhergang:**
- Zwei Hauptspeisepumpen fielen aus
- RESA wurde aktiviert ☒ Regelstäbe fielen in den Kern
- Nachzerfallswärme ☒ Druck im Primärkreislauf des Reaktors steigt
- Überdruckkompensation durch Sicherheitsventil ☒ Ventil schließt nicht mehr
- Kühlmittel trat offen ins Containment ☒ Kühlmittelverluststörfall
- Durch Fehler in den Anzeigen im Kontrollraum zeigten diese den Vorfall nicht an ☒ Ventil blieb offen, Druck im PKK sank weiter
- Gleichzeitig: 2 Ventile des Notspeisesystems klemmten ☒ Notspeisesystem funktionierte nicht ☒ kein Wasser in die Dampferzeuger zur Nachzerfallswärmeabfuhr ☒ wurde nach 8 Minuten bemerkt und Ventile von Hand geöffnet

Stör- und Unfälle: Three Mile Island

- Druck im Primärsystem sinkt weiter und die Notkühlsysteme laufen an
- Durch das Leck im Primärkreislauf verteilt sich das Wasser dort um ☒ Schichtleiter bricht damit die Notkühlung ab
- Nachzerfallswärme wird nun nicht mehr abgeführt ☒ Zirkonium-Wasser Reaktion setzt ein ☒ Hüllen der Brennstäbe oxidieren und es bildet sich Wasserstoff ☒ gelangte durch Leck in das Containment und bildete mit Sauerstoff Knallgas
- Das radioaktive Kühlmittel sammelte sich im Sumpf vom Sicherheitsbehälter, durch Fehler wurde es außerhalb des Containments gepumpt ☒ gaste aus und gelang in die Umgebung


Stör- und Unfälle: Three Mile Island

- Folgen:
- Nach ca. 16 h wurde die Kontrolle über den Reaktor wieder erlangt
- Ein Schaden am Reaktor von ungefähr 975 Mio. \$
- Schätzungen: Während des Zwischenfalls ist radioaktives Gas (Krypton) mit ca. 10^{15} Bq entwichen
- Bis in einem Radius von 80 km wurden ca. 2 Millionen Einwohner der Strahlenbelastung von 0,02 mSv ausgesetzt
- 8 Mitarbeiter wurden mit einer integrierten Strahlendosis von 10 mSv belastet
- Trotz der relativ ungefährlichen Strahlenbelastung verließen ungefähr 140.000 Menschen die Umgebung, weil keine Aufklärung statt fand

Stör- und Unfälle: Tschernobyl




Stör- und Unfälle: Tschernobyl

- Das Kernkraftwerk Tschernobyl lag nahe der Stadt Prypjat, Ukraine
- Es bestand aus 4 und 2 weiteren damals im Bau befindlichen Blöcken
- Sie waren alle RBMK Reaktoren (reaktor balschoi moschnosti kanalnoi)  Graphitmoderierter Siedewasser-Druckröhrenreaktor
- Am 26. April 1986 kam es im Block 4 zu einer Kernschmelze und einer darauf folgenden Explosion
- Dieses Ereignis wird als Super-GAU klassifiziert und gilt als der bisher zweit-schwerste nukleare Unfall und als eine der schlimmsten Umweltkatastrophen


Stör- und Unfälle: Tschernobyl

- Zwei Hauptgründe, warum es zur Kernschmelze kam

1. Konstruktionsprobleme der RBMK:

- positiver Dampfblasenkoeffizient
- kein Containment
- Regelstabspitzen bestehen aus Graphit  Reaktivität wird prompt überkritisch
- RESA benötigt ca. 10-20 s

2. Menschliches Versagen:

- Im Rahmen eines Sicherheitsexperimentes kam es zu Fehlverhalten des Kraftwerkspersonals  Sicherheitsvorschriften wurden nicht eingehalten; zum Teil war unqualifiziertes Personal anwesend



Stör- und Unfälle: Tschernobyl

- **Unfallhergang:**
- Wegen Wartungsarbeiten sollte der Reaktor abgeschaltet werden ☒ Sicherheitsüberprüfung, ob Rotationsenergie der auslaufenden Turbine ausreichen würde, um die Zeit (40-60 s) bis zum Anlaufen der Notstromaggregate zu überbrücken ☒ verletzte Sicherheitsvorschrift
- **25.04.1986, 1:06 Uhr**
 - Beginn der Abschaltung des Reaktors
- **13:05 Uhr**
 - Die Leistung des Reaktors wird nur zu 50 % heruntergefahren, gleichzeitig wird Turbogenerator 7 abgeschaltet ☒ Test wird auf 23 Uhr verschoben, weil Energiebedarf zu hoch ist
- **14:00 Uhr**
 - Damit kein Wasser in den Reaktor gepumpt wird, falls ein Notsignal auftritt, wird das Notkühlsystem abgeschaltet
- **23:10 Uhr**
 - Der Reaktor wird nun auf 25 % der Nennleistung heruntergefahren

Stör- und Unfälle: Tschernobyl

- **26.04.1986, 00:00 Uhr**
 - Schichtwechsel des Kraftwerkspersonals
- **00:28 Uhr**
 - Entweder durch einen Bedienfehler oder wegen eines technischen Defektes sank die Reaktorleistung auf nur noch 1 % der Nennleistung ☒ ¹³⁵Xe Vergiftung
- **00:32 Uhr**
 - Leistungsabnahme wurde bemerkt ☒ Steuerstäbe wurden herausgefahren ☒ durch hohe Absorptionsrate vom Xenon erhöhte sich die Leistung auf nur 7 % ☒ weitere WISSENTLICHE Missachtung der Sicherheitsvorschrift
- **01:07 Uhr**
 - Notkühlsystem weiterhin ausgeschaltet ☒ Stromverbrauch muss trotzdem simuliert werden (für Test) ☒ 2 Hauptkühlmittelpumpen werden in Betrieb genommen ☒ verbesserte Wärmeabfuhr aus dem Reaktorkern ☒ positiver Dampfblasenkoeffizient bewirkt Reaktivitätsabnahme ☒ Reaktorsteuerung reagiert mit dem Herausfahren von weiteren Steuerstäben

Stör- und Unfälle: Tschernobyl

- **01:19 Uhr**
 - Warnsignale führen zu erhöhter Wasserzufuhr in den Reaktor ☒ Reaktor wird stabilisiert, der Wasserpegel hat fast 2/3 des vorgeschriebenen Wertes erreicht
- **01:23 Uhr**
 - Dampfzufuhr zur Turbine wurde geschlossen ☒ keine Wärmeabfuhr mehr ☒ Temperatur von Kühlmittel stieg an ☒ Leistungsanstieg ☒ Einfahren der Steuerstäbe ☒ wurden zu langsam eingefahren (durch Xe Vergiftung zu weit herausgefahren) und konnten Leistung nicht mehr stabilisieren ☒ Neutronenfluss steigt stark an und baut stärker Neutronengifte ab ☒ immer mehr Dampfblasen
 - Schichtleiter Akimow löst die Notabschaltung des Reaktor aus ☒ Alle Steuerstäbe werden in den Reaktor gelassen, Spitzen bestehen jedoch aus Graphit ☒ Moderator, erhöhte nochmal die Reaktivität ☒ 4 s später ist die Leistung auf das 100 x der Nennleistung angestiegen
 - Die Stäbe brauchen 20 s Zeit ☒ Hitze verformt Kanäle der Steuerstäbe, die Ummantelungen reagieren mit dem Wasser und Graphit ☒ Sekunden nach nuklearer Leistungsexkursion explodierte der Reaktorkern durch Wasserstoffbildung

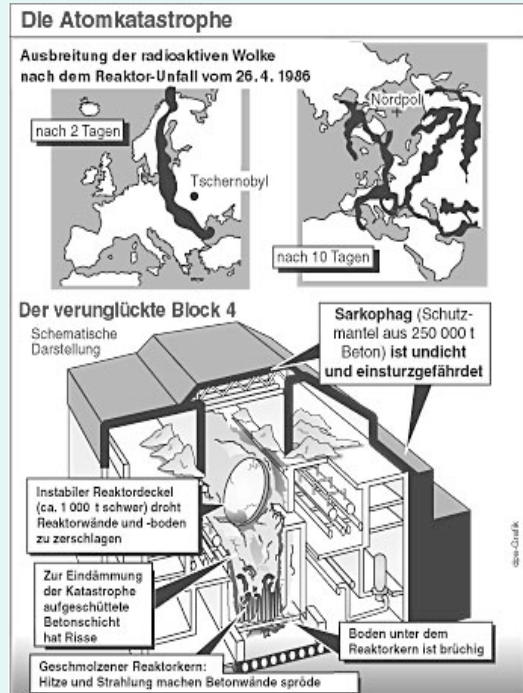
Stör- und Unfälle: Tschernobyl

- Der Deckel des Reaktorkerns war 1000 t schwer und nach der Explosion um 15 ° nach oben gebogen
- Das Dach des Reaktorgebäudes galt nur als Wetterschutz (!) und wurde sofort zerstört ☒ Große Mengen an radioaktivem Material wurde in die Atmosphäre und Umgebung durch die Explosion und Graphitbrand verteilt
- Obwohl eine Explosion und Zerstörung des Reaktors ersichtlich waren, beharrte Akimow darauf, dass der Reaktor nur gekühlt werden müsse
- Bis zum Abend wurden keine Sicherheitsmaßnahmen unternommen



Stör- und Unfälle: Tschernobyl

- **Folgen:**
- Ausbreitung der radioaktiven Wolke über benachbarte Staaten, größte Konzentrationen über Ukraine, Russland und Weißrussland
- Um das zerstörte Reaktorgebäude wurde ein „Sarkophag“ errichtet ☒ muss dringend erneuert werden
- Block 3 wurde erst am 15. Dezember 2000 still gelegt
- Es wurde ein Gebiet mit 30km Radius um den Reaktor evakuiert ☒ 200.000 Menschen mussten umgesiedelt werden
- Knapp 500 Feuerwehrleute und Personal wurden stark verstrahlt
- 600.000 Liquidatoren wurden einer zu hohen Strahlendosis ausgesetzt



Stör- und Unfälle: Tschernobyl

- Gemessene Strahlendosis bei direkt Verstrahlten: 150 -300 mSv
- Opferzahlen sind bis heute nicht bekannt; zukünftige Schäden müssen einberechnet werden
- Katastrophale Auswirkungen: Erhöhte Krebsraten
☒ Leukämie, Schilddrüsenkrebs, Missbildungen und Behinderungen, Fehlgeburten
- Verseuchte Lebensmittel, wirtschaftliche Schäden

Brennstoffkreislauf

Brennstoffkreislauf: Transport von Atommüll

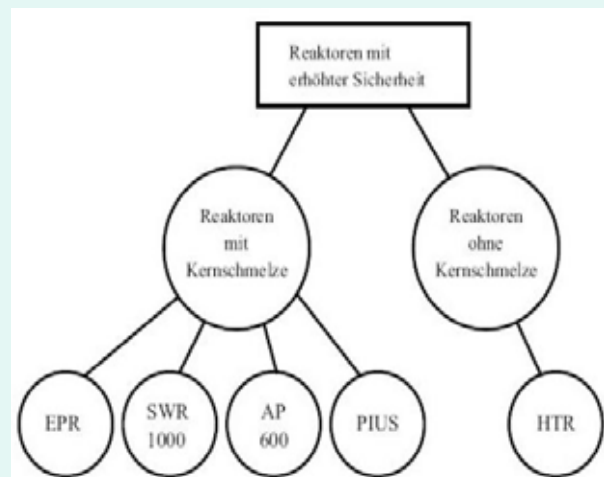
- Transport durch **CASTOR** Behälter ☒ **Cask for Storage and Transport of Radioactive Material**

- Behälter müssen verschiedenen Anforderungen genügen:
 1. Aufprall aus großer Höhe auf Betonfundament
 2. Feuerfestigkeit
 3. Wasserdruck in verschiedenen Tiefen
 4. Flugzeugabstürze

Ausblick auf neue Sicherheitssysteme

Ausblick auf neue Sicherheitssysteme

- Verbesserung der LWR Technik ☒ durch verbesserte Nachwärmeabfuhr wird das Kernschmelzrisiko verringert
- Außerdem bei LWR Core-Catcher und verbesserte Reaktorschutzgebäude
- Konstruktion von Reaktoren ohne Kernschmelzrisiko ☒ HTR
- Sollte eine Kernschmelze stattfinden, muss die Schmelze im Containment verbleiben, die Barrieren müssen extremsten Bedingungen stand halten
- Dazu gehören auch externe Eingriffe wie naturbedingte (Erdbeben, Unwetter) und durch Menschen hervorgerufene (Flugzeugabstürze, Terrorangriffe) Eingriffe



Ausblick auf neue Sicherheitssysteme

- **Reaktor ohne Kernschmelzrisiko: Hochtemperaturreaktor (HTR)**
- Reaktor mit gasförmigen Kühlmittel, Graphitmoderator, keramische Werkstoffe im Reaktorkern
- Um den Brennstoff wird Kugelförmig Graphit angelegt
- So bleiben sie bis zu einer Temperatur von 2100° C thermisch, chemisch und mechanisch stabil
- Die Nachzerfallswärme wird allein durch die Abgabe an die äußere Umgebung abgegeben (Wärmeleitung durch Keramik, Wärmestrahlung, Konvektion) ☒ Temperatur der Brennstoffkugeln bleiben unter 1500° C stabil ☒ Kernschmelze ist ausgeschlossen
- Außerdem: negativer Temperaturkoeffizient wie im LWR
- Zur Zeit existieren 4 Prototyp-Kraftwerke (2 in Deutschland, 2 in USA)
- Noch keine Durchsetzung im praktischen Betrieb, da die Brennstoffkugeln nicht aufbereitet werden können ☒ zuerst muss sicheres Endlager vorhanden sein

Zusammenfassung

Zusammenfassung

- Sicherheit in Kernkraftwerken wird heutzutage groß geschrieben: Mehrschichtige Barrieren und sich ständig weiter entwickelnde Sicherheitsmaßnahmen sorgen in Deutschland für moderne Kraftwerke, die zu den sichersten der Welt zählen.
- Hier gibt es aber nur mehrheitlich DWR, technisch könnte man schon längst mit HTR Strom produzieren, politisch wird dies leider verhindert.
- Reaktoren vom Typ RBMK sind immer noch in der ehemaligen Sowjetunion in Betrieb und der Unfall von Tschernobyl zeigt auch nach fast 24 Jahren, dass es keine 100% ige Sicherheit gibt und menschliches Versagen immer eine Rolle spielt, solange Menschen in Kernkraftwerken arbeiten

Quellenverzeichnis

- Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: *Zur Sicherheit des Betriebs der Kernkraftwerke in Deutschland*. 3. Auflage, Köln, Januar 2003, ISBN 3-931995-23-2
- Vorlesungs-Skript „Reaktorsicherheit“ von Prof. Dr. -Ing. Kurt Kugeler, RWTH Aachen, Lehrstuhl für Reaktorsicherheit und- technik.
- <http://www.kernenergie.de/kernenergie/Themen/Sicherheit/Sichere-Kernenergie/>
- www.kernfragen.de
- <http://www.atomkraftwerk.biz/tschernobyl.html>
- <http://www.washingtonpost.com/>
- <http://www.ohiocitizen.org/>
- <http://www.taz.de>
- <http://www.threemileisland.org/downloads//354.pdf>
- <http://ehp.niehs.nih.gov/realfiles/members/1997/105-1/wing.html>
- <http://www.energieinfo.de/eglossar/node80.html>
- <http://www.benoroe.de/tschernobyl/>
- www.wikipedia.de