



Einführung für Besucherführer

Einführung



Einführung

Wer bin ich?

- **Carsten Fister**
- Geburtsjahr 1977
- 1998-2005 Diplomstudium Physik und Astronomie an der LMU München
- seit 2007 am Simulatorzentrum der KSG|GfS in Essen:
 - 2007-21 Simulatorenbildner für KKW mit Siedewasserreaktor (Philippsburg I, Gundremmingen B & C)
 - seit 2015 HF-Trainer
- seit 2019 Ausbildungsunterstützung am FRM II



Einführung

Agenda

Was wollen wir heute machen?

- Kurze Einführung / Motivation
- Reaktorbetrieb (*inkl. Status des Wiederanfahrens*)
- Nukleare Sicherheit (*inkl. C-14-Ereignis*)
- Bestrahlung (*inkl. Mo-99*)
- Wissenschaft mit Neutronen
- Entsorgung abgebrannter Brennelemente (*inkl. Status CASTOR-Beladung*)
- Fragen



Warum machen wir Besucherführungen?

- Technisch und wissenschaftlich interessierte Öffentlichkeit informieren
- Neue Mitarbeiter gewinnen
- Vorbehalte in der Öffentlichkeit abbauen
- Falschaussagen von Medien und Gegnern widerlegen
- Nutzen der Forschung für die Allgemeinheit aufzeigen
- Allgemein den Ruf des FRM II fördern



FRM II – Allgemeine Hinweise zur Führung

Bevor es losgeht...

1. Besucher am FRM II begrüßen und sich selbst vorstellen
2. In Stichworten den Führungsweg (Stationen) zusammenfassen
3. „Spielregeln“ klarstellen:
 - Kleidung
 - Verwendung von Audioguides
 - Verhalten in der Anlage
 - Fragen sofort stellen
4. Grundinformationen über die Gruppe erfragen:
 - Vorwissen
 - Spezielle Interessen
 - Erwartungen / Wünsche

} Führungsinhalte an Niveau und Interessen der Gruppe anpassen!
5. Im Notfall: OSD informieren, bei Gruppe bleiben!

Thema „Kleidung“:

- Unpassende Kleidung sind z.B. Flip-Flops, hohe Absätze, kurze Hosen/Röcke/Kleider (Verletzungsgefahr!)
- Am Tag der offenen Tür können Gäste mit unpassender Kleidung nicht an Führungen teilnehmen
- Bei sonstigen Führungen kann ein Overall oder Sicherheitsschuhe gestellt werden

Thema „Verhalten in der Anlage“:

- In der Gruppe bleiben
- Nichts anfassen
- Keine Türen selbständig öffnen
- Keine Gegenstände aus der Anlage mitnehmen oder dort zurücklassen



FRM II – Allgemeine Hinweise zur Führung

Alarmer

Feueralarm

Zwei Töne, die im 1-Sekunden-Takt wechseln (wie Martinshorn)

Was tun?

Gebäude auf normalen Wegen (inkl. Ausweisler, Ausgangsmonitore,...) verlassen und einen Sammelpunkt aufsuchen. Keine Aufzüge benutzen!

Räumungsalarm

Im 2-Sekunden-Takt unterbrochener Ton

Was tun?

Gebäude auf normalen Wegen (inkl. Ausweisler, Ausgangsmonitore,...) verlassen und einen Sammelpunkt aufsuchen. Keine Aufzüge benutzen.

Fluchalarm

Im 1-Sekunden-Takt abschwellender Heulton

Was tun?

Kontrollbereich unverzüglich und auf direktem Weg verlassen. Ausweisler und Ausgangsmonitore ignorieren, Fluchttüren nutzen (**roter Griff!**).

Außerhalb Kontrollbereich in geschlossenen Räumen bleiben und Durchsage abwarten.

Bei Feueralarm fahren Aufzüge auf Zugangsebene und dürfen nur noch von der Feuerwehr genutzt werden!

Der Fluchalarm wird nur im Kontrollbereich bei Aktivitätsaustritt ausgelöst. Er spielt normalerweise für Besucherführungen keine Rolle, außer wenn bei der Führung auch die Reaktorhalle betreten wird.



FRM II – Allgemeine Hinweise zur Führung

Dosimeter

Warum trägt der Besucherführer ein Dosimeter?

- Verpflichtend für jede Person im Kontrollbereich (Strahlenschutzgesetz).
- Bei beruflicher Tätigkeit zusätzlich noch amtliches Dosimeter vom Arbeitgeber.

Warum hat die Besuchergruppe nur ein einziges Dosimeter?

- Absprache mit der Behörde, um die Organisation zu erleichtern.
- Ist zulässig, solange die Gruppe stets zusammen bleibt: Wert des Gruppendosimeters gilt für jeden Einzelnen aus der Gruppe.

Welche Dosis erhält man auf einer Führung?

- Eigentlich keine. Durch Messungenauigkeiten können aber minimale Werte angezeigt werden (z.B. 0,1 μSv).

Kontrollbereich = Experimentierhalle oder Reaktorhalle!
(andere KB werden bei Führungen nicht begangen)

Achtung: Bei Führungen bis zum Beckenrand erhält JEDER Besucher ein Dosimeter

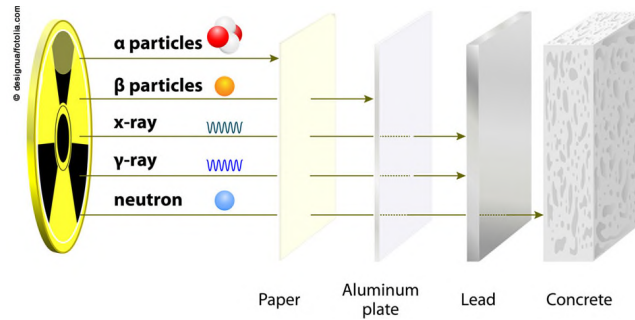
Anzeigen am Dosimeter:

- Gerät zeigt nur volle μSv an
- Monitor bei Rückgabe zeigt eine Nachkommastelle an
- Ein einzelnes Neutron kann bis zu 10 μSv bewirken!



FRM II – Allgemeine Hinweise zur Führung

Strahlung



- Relevant für Besucherführungen ist ausschließlich **γ-Strahlung!**
- **Neutronenstrahlung** tritt nur bei Reaktorbetrieb, und dann auch nur im Nahbereich des Reaktors auf.
- **α- und β-Strahlung** tritt nur beim Umgang mit offenen radioaktiven Substanzen auf.
- **Röntgenstrahlung** tritt nur bei Betrieb von Röntgengeräten in deren unmittelbarer Nähe auf.



FRM II – Allgemeine Hinweise zur Führung

Strahlung (Vergleichswerte $EnBW$, in μSv)



— **EnBW**

PAUSE



Einführung für Besucherführer

FRM II – Reaktorbetrieb



FRM II – Reaktorbetrieb

Randdaten

- eine der wenigen reaktorbasierten Hochfluss-Neutronenquellen weltweit (4-15 je nach Zählweise)
- maximaler nutzbarer Neutronenfluss von $2 \cdot 10^{14}$ n/(cm²·s)
- erbaut 1996 bis 2003, erste Kritikalität im März 2004
- ersetzte die älteren Forschungsreaktoren in Garching (FRM, 1957) und Jülich (FRJ-2, 1962)
- Eigentümer ist der Freistaat Bayern, Betreiberin die Technische Universität München

„Reaktorbasierte Hochfluss-Neutronenquellen“ als Unterscheidung zu Hochfluss-Spallationsquellen

Der FRJ-2 ist umgangssprachlich auch bekannt als „DIDO“, was aber eigentlich der Name des Reaktortyps ist (6 Stück gebaut in UK, AUS, DK und D)

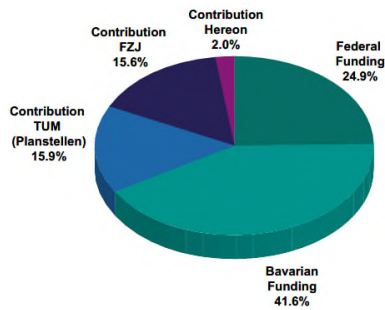
Spallationsquellen = Teilchenbeschleuniger, die durch Protonenbeschuss ein Target (meist Hg oder Pb) zum Abdampfen von Neutronen zwingen. Arbeiten gepulst.



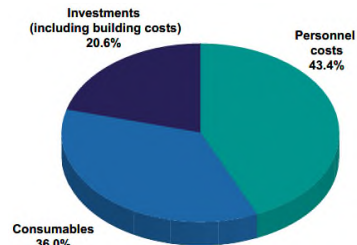
FRM II – Reaktorbetrieb

Randdaten – Finanzierung und Ausgaben

Finanzierung (2021):



Ausgaben (2021):



Die Betriebskosten des MLZ liegen bei ca. **70 Mio. €** im Jahr

Keine Aufschlüsselung der Betriebskosten auf Betrieb und Wissenschaft verfügbar.

Ungeachtet der obigen Prozentzahlen werden die Kosten für den Reaktorbetrieb zu 100% vom Freistaat Bayern getragen. Die übrigen Kostenträger finanzieren im Wesentlichen die wissenschaftliche Seite.

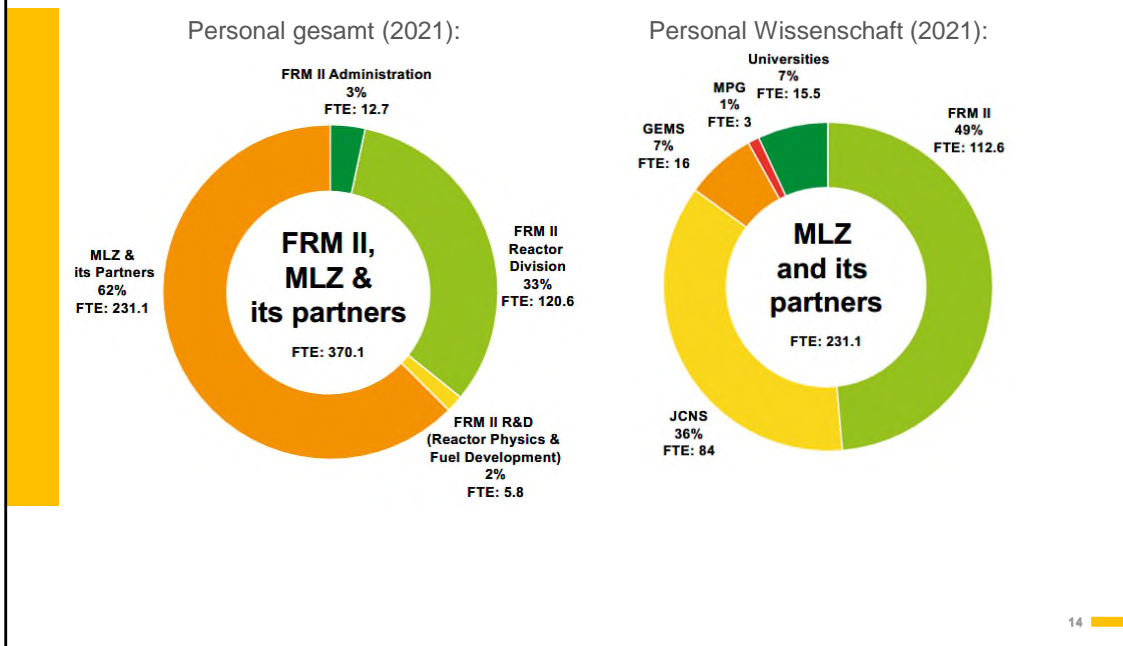
Ausgaben nach Kostenstellen:

- TUM ca. 50 Mio. €
- FZJ ca. 18 Mio. €
- Hereon ca. 2 Mio. €



FRM II – Reaktorbetrieb

Randdaten - Personal



FTE = Full Time Equivalents



FRM II – Reaktorbetrieb

Reaktordaten

Reaktor:	FRM	FRJ-2	FRM II	RFH	HFIR
Standort	Garching (D)	Jülich (D)	Garching (D)	Grenoble (F)	Oak Ridge (USA)
Baujahr (Umbau)	1957	1962 (1972)	2004	1971 (1995)	1965 (1989, 2007)
Neutronenfluss (maximal)	$6,6 \cdot 10^{12}$	$3 \cdot 10^{14}$	$8 \cdot 10^{14}$	$15 \cdot 10^{14}$	$7 \cdot 10^{14}$
Wärmeleistung	4 MW	23 MW	20 MW	58 MW	85 MW
Anreicherung (zuletzt/aktuell)	45 %	80 %	90,5 %	93 %	93 %

Vorgänger des FRM II

Weitere reaktorbasierte Hochfluss-Neutronenquellen

Weitere Forschungsreaktoren mit hohen Neutronenflüssen ($>10^{14}$):

- ATR Arco/USA 250 MW, $15 \cdot 10^{14}$ (nur Bestrahlung innerhalb des Reaktors)
- BR2 Mol/Belgian 100 MW, $12 \cdot 10^{14}$ (nur Bestrahlung innerhalb des Reaktors)
- BRR Budapest/Ungarn 10 MW / $2 \cdot 10^{14}$
- ETRR-2 Inshas/Ägypten 22 MW / $2,8 \cdot 10^{14}$
- HANARO Daejeon/Südkorea 30 MW / $4,4 \cdot 10^{14}$
- MARIA nahe Warschau/Polen 30 MW / $4 \cdot 10^{14}$
- MURR Columbia/USA 10 MW, $6 \cdot 10^{14}$
- NIST Gaithersburg/USA 20 MW, $3,5 \cdot 10^{14}$
- PIK nahe St. Petersburg/Russland 100 MW / $15 \cdot 10^{14}$ (aus technischen Gründen derzeit nicht in diesem Bereich betrieben)
- SAFARI-1 Pelindaba/Südafrika 20 MW / $3 \cdot 10^{14}$

Außerdem mit beinahe 10^{14} :

- OPAL nahe Sydney/Australien 20 MW / $0,9 \cdot 10^{14}$
- HFR Petten/Niederlande 45 MW / $0,8 \cdot 10^{14}$

Diese Liste ist nur als Referenz für Fragen gedacht!



FRM II – Reaktorbetrieb

Forschungsreaktor - Leistungsreaktor

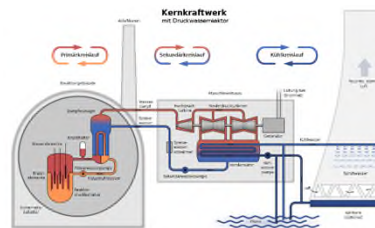
Forschungsreaktor (Neutronenquelle)

- Ziel:
Bereitstellung von Neutronen für die Forschung – idealerweise möglichst viele in einem möglichst großen Energiebereich
- Beispielwerte FRM II:
Max. Neutronenfluss: $8 \cdot 10^{14} \text{ n}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$
Thermische Leistung: 20 MW
Elektrische Leistung: -
Baukosten: 435 Mio. €
Betriebspersonal: 100



Leistungsreaktor (DWR)

- Ziel:
Bereitstellung von Dampf zum Betrieb eines Turbogenerators, idealerweise möglichst viel und zu geringen Kosten
- Beispielwerte KKI 2:
Max. Neutronenfluss: $1 \cdot 10^{14} \text{ n}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$
Thermische Leistung: 4.000 MW
Elektrische Leistung: 1.400 MW
Baukosten: 4 Mrd. DM
Betriebspersonal: 350



Für Forschungsreaktoren ideal:

- Maximaler Neutronenfluss bei minimaler Wärmeerzeugung
- Viele verschiedene Neutronenenergien (schnell, heiß, thermisch, kalt, ultrakalt...)
- Kleiner Raumwinkelbereich

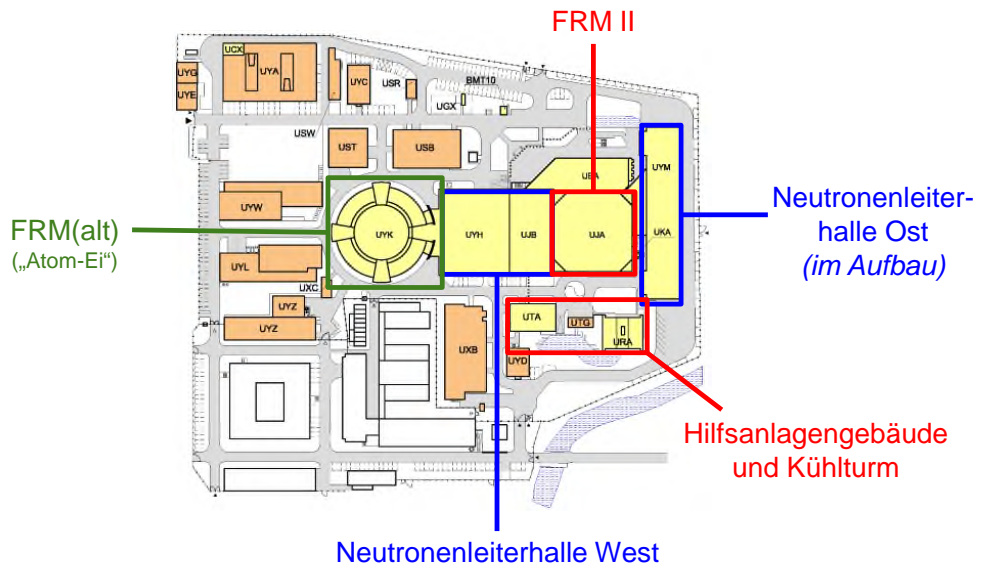
Zur Orientierung:

Mit 1.000-1.400 MW elektrischer Leistung kann ein modernes KKW ca. 2,5-3,5 Millionen Haushalte versorgen.



FRM II – Reaktorbetrieb

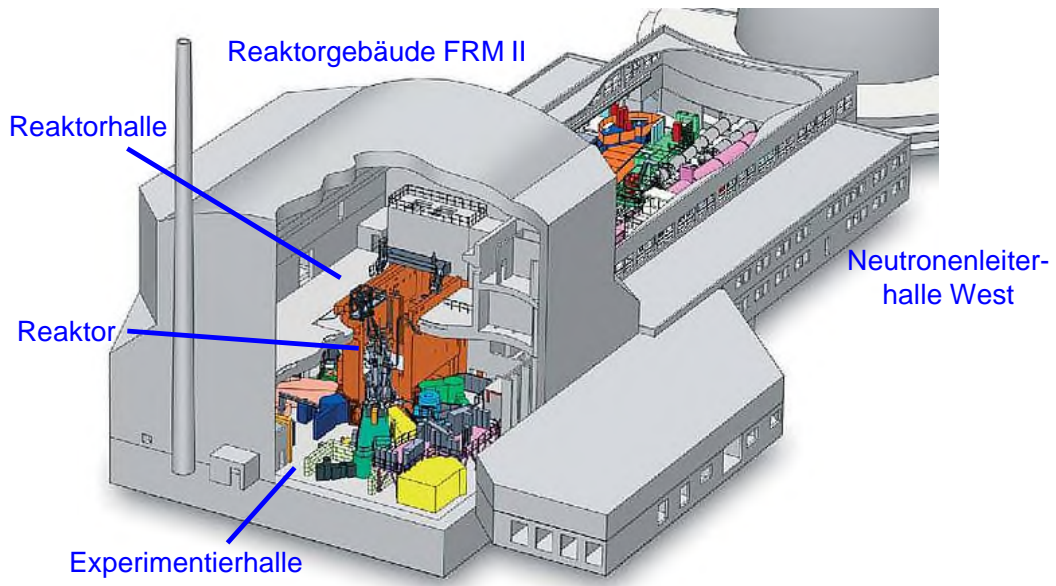
Geländeübersicht





FRM II – Reaktorbetrieb

Gebäudeübersicht

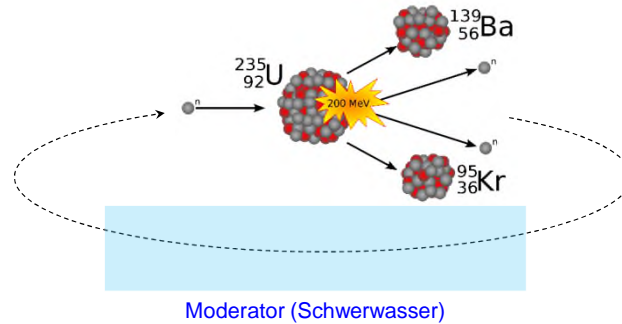




FRM II – Reaktorbetrieb

Kernspaltung

Ein **thermisches Neutron** wird von einem U-235-Kern absorbiert. Durch die zusätzliche Energie zerbricht dieser in zwei Tochterkerne und 2-3 **Spaltneutronen**.



Spaltneutronen (ca. 2 MeV) werden im Moderator - am FRM II Schweres Wasser - gebremst, bis die Energie im **thermischen** Bereich liegt (ca. 0,1 eV). Ein Teil wird von U-238 oder Strukturmaterialien absorbiert, ein Teil löst neue Spaltungen aus, der Rest steht für die Forschung zur Verfügung.

Absorption in U-238 führt zur Erzeugung von Transuranen, v.a. Plutonium.

Absorption in Strukturmaterialien führt zu deren Aktivierung. Bekanntes Beispiel ist Co-60 in kobaltlegiertem Stahl.



FRM II – Reaktorbetrieb

Wahl des Moderators

(Leichtes) Wasser H_2O

- aus Wasserstoff und Sauerstoff
- moderiert sehr gut (ca. 18 Streuungen von schnell bis thermisch)
- absorbiert gut (ca. 1:70), reduziert Neutronenfluss deutlich
- kostet sehr wenig (0,35 \$/Liter)
- Neutronenabsorption in Wasser ist unproblematisch

Schweres Wasser D_2O

- aus Deuterium und Sauerstoff
- moderiert gut (ca. 25 Streuungen von schnell bis thermisch)
- absorbiert praktisch nicht (ca. 1:5700), kaum Einfluss auf Neutronenfluss
- ist teuer (ca. 600 \$/Liter)
- Neutronenabsorption in Schwerwasser erzeugt Tritium (radioaktiv!) und He-3 (starker Neutronenabsorber)

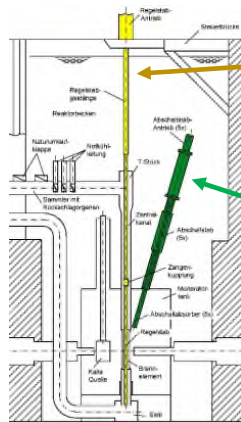
Merke: Absorptionsverhältnis von H_2O zu D_2O beträgt 80:1 !

Mit anderen Worten: Für jedes absorbierte Neutron in D_2O würden in der gleichen Menge H_2O 80 Neutronen absorbiert!



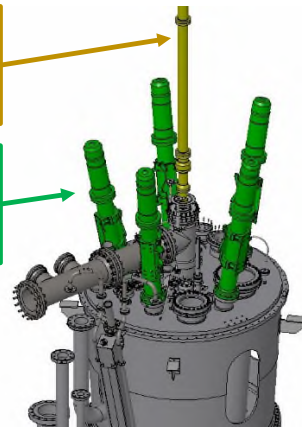
FRM II – Reaktorbetrieb

Steuerung der Kernreaktion



1 Regelstab:
Stufenlos verfahrbar zur Regelung der Reaktorleistung. Antrieb oberhalb des Reaktorbeckens.

5 Abschaltstäbe:
Verfahrbar zum Anfahren des Reaktors und für Tests. Gekapselte Antriebe im Reaktorbecken.



- Stäbe enthalten **Hafnium** (Neutronenabsorber)
- **Magnetische** Kupplungen zwischen Antrieb und Stab
- Reaktorschnellabschaltung (**RESA**): Abschalten der Elektromagnete in den Kupplungen, Stäbe fallen in untere Endstellungen
- Sichere Abschaltung schon mit **Regelstab** oder **4v5 Abschaltstäbe**

Falls die Frage kommt: Warum nehmen wir Hafnium als Absorber, nicht Bor oder Cadmium wie die KKW?

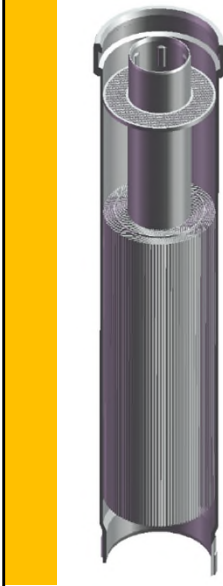
- Hafnium hat einen geringeren Wirkungsquerschnitt. Damit ermöglicht es bei nur einem Regelstab eine feinfühlere Regelung. Außerdem hat es dadurch eine deutlich längere Standzeit. Der höhere Preis von Hafnium fällt bei Forschungsreaktoren nicht so ins Gewicht (weniger Stäbe).
- Bor und Cadmium haben einen höheren Wirkungsquerschnitt und wirken damit deutlich „bissiger“. Die nötige Feinfühligkeit wird durch die Aufteilung auf viele separat zu verfahrenende Stäbe (Cadmium) bzw. die Verdünnung in einem großen Wasservolumen (Bor) erreicht. Der niedrigere Preis spielt im kommerziellen Betrieb eine größere Rolle.

Dieses Dokument ist vertraulich. Die Vervielfältigung, Weitergabe oder Nutzung dieses Dokuments oder seiner Inhalte ist ohne ausdrückliche schriftliche Genehmigung nicht gestattet. Bei Zweifelsfragen muss mit Schabbersatzförderungen gerechnet werden. KSG/GIS behält sich alle gewerblichen Schutzrechte und Urheberrechte vor.

Das Simulatorzentrum
KSG | GfS

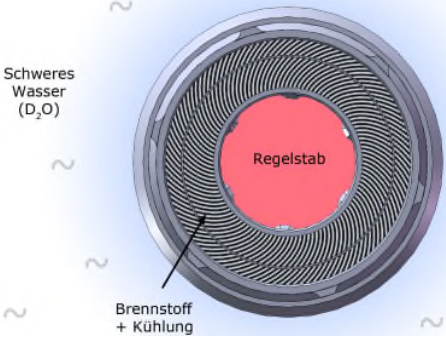
FRM II – Reaktorbetrieb

Brennelement



Spezielles Brennelement für FRM II:

- 130 cm x 24 cm Ø
- 53 kg, davon 8 kg Uran
- Anreicherung 90,5 % U-235
- Uransilizid, als Pulver in Aluminiumplatten verpresst
- Betriebstemperatur 110 °C innen, <100 °C außen
- Nur ein BE im Reaktor
- Reicht für 60 Tage Betrieb



22

Anreicherung:

In der Natur 0,7 % U-235

Anreicherung mittels Gaszentrifugen oder Gasdiffusion

Am FRM II ursprünglich 92,5 %, ab der Charge 2019 nur noch 90,5 %

Geometrie FRM II:

Brennstoffplatten in Evolventenform, stets gleicher Abstand (=Kühlmitteldurchfluss) unabhängig von Radialposition

Betrieb des FRM II:

4 x 60 Tage Betrieb („Zyklus“) pro Jahr, dazwischen Instandhaltung

Aktuell wegen Ersatz des Zentralkanals nicht in Betrieb, letzter Zyklus im Januar-März 2020

Brennstoffkosten FRM II:

- einzelnes Brennelement ca. 1 Mio. €
- pro Jahr ca. 4 Mio € für Brennelemente

Herkunft des Urans:

Alle bislang beschafften Brennelemente enthielten hochangereichertes Uran aus Russland (nur auf konkrete Frage hin gegenüber Besuchern ansprechen).

HEU für weitere 20 BE ist aktuell (2022) bei Framatome in Frankreich zur Weiterverarbeitung eingelagert.



FRM II – Reaktorbetrieb

Brennelement



Spezielles Brennelement für FRM II:

- 130 cm x 24 cm Ø
- 53 kg, davon 8 kg Uran
- Anreicherung 90,5 % U-235
- Uransilizid, als Pulver in Aluminiumplatten verpresst
- Betriebstemperatur 110 °C innen, <100 °C außen
- Nur ein BE im Reaktor
- Reicht für 60 Tage Betrieb

Zum Vergleich Brennelement für KKI-2:

- 483 cm x 23 cm x 23 cm
- 820 kg, davon 523 kg Uran
- Anreicherung < 5 % U-235
- Uranoxid, als Tabletten in Zirkaloy-Rohren
- Betriebstemperatur 2.000 °C innen, 600 °C außen
- 193 BE im Reaktor
- Typischerweise für ca. 1.000 Tage Betrieb (mit Umsetzen)



Geometrie DWR:

17x17 Brennstäbe, jeder davon 4,8 m lang und gefüllt mit 1 cm langen zylindrischen Brennstofftabletten;
Kühlmitteldurchfluss wird durch „Wasserstäbe“ (weglassen einzelner Brennstäbe) optimiert

Betrieb eines DWR:

Pro Jahr 2-3 Wochen Wartungsstillstand („Revision“), ansonsten Dauerbetrieb.
Brennelemente werden typischerweise 3 Jahre an verschiedenen Kernpositionen genutzt (Umsetzen während der Revision)

Brennstoffkosten DWR:

- einzelnes Brennelement ca. 600.000 €
- pro Jahr ca. 40 Mio € für Brennelemente



FRM II – Reaktorbetrieb

HEU / LEU



Der FRM II nutzt hochangereichertes Uran (**HEU**) mit 90,5 % U-235 (bis 2019 92,5 %).

Warum?

- Sehr hohe Neutronenflüsse für Wissenschaft benötigt ($\geq 10^{14}$)
- Je höher die Anreicherung, desto niedriger die thermische Leistung (P_{th}) bei gleichem Neutronenfluss
- Positiver Nebeneffekt: Weniger langlebige Transurane in abgebrannten Brennelementen (v.a. Plutonium)

Aber..

- Laut Betriebsgenehmigung HEU-Betrieb nur zulässig, bis geeigneter LEU-Brennstoff verfügbar ist
- Forschung nach alternativem Brennstoff seit 2003 in Deutschland, Frankreich, Belgien und USA

Thema Anreicherung / Waffenfähigkeit:

HEU = Highly Enriched Uranium (≥ 20 Gew.-% U-235)

LEU = Low-Enriched Uranium (< 20 Gew.-% U-235)

Atomwaffen benötigen möglichst reinen Spaltstoff. Selbst HEU-Brennstoff muss daher für die potentiellen Nutzung in Atomwaffen erst wiederaufgearbeitet werden, denn das Uran liegt hier in Verbindungen wie UO_2 , U_3Si_2 , etc. vor.

Thema thermische Leistung:

Wegen der niedrigeren P_{th} ist auch die Nachzerfallsleistung geringer, und somit auch die abzuführende Wärmemenge im Störfall. Dies erleichtert die Auslegung.

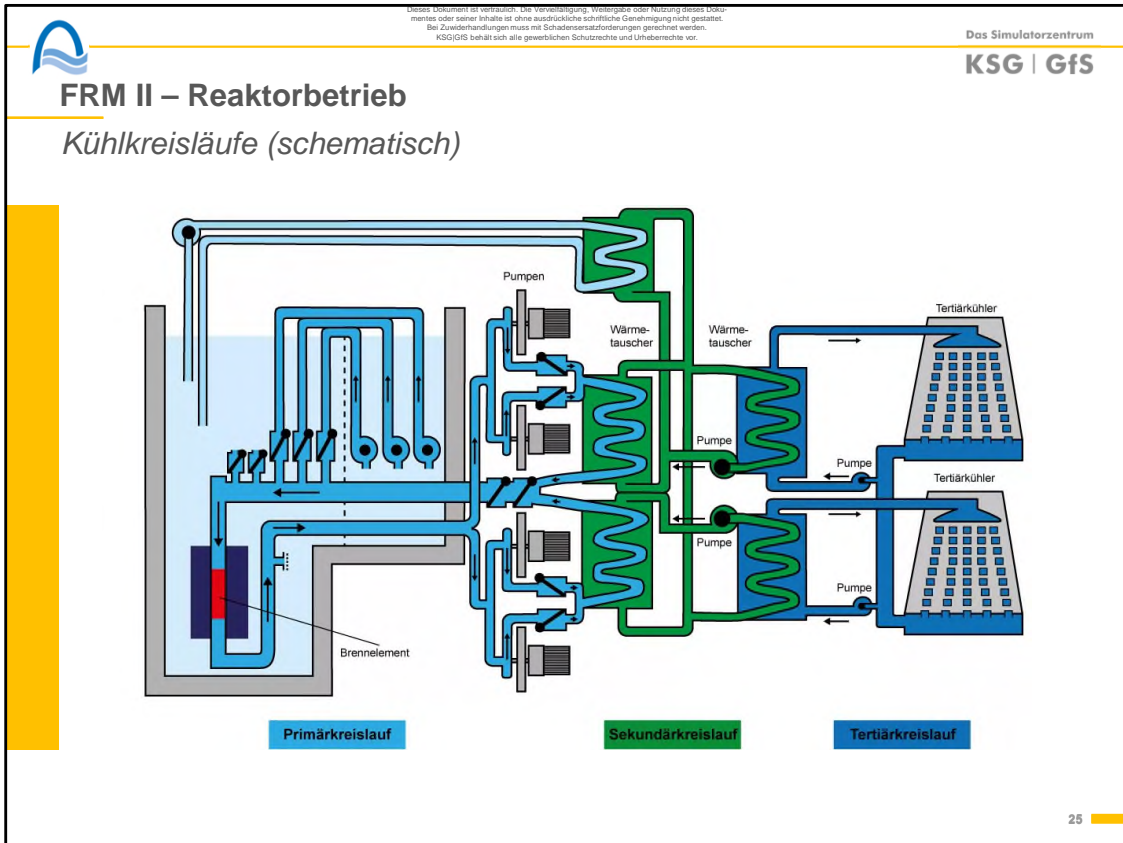
Thema Transurane:

Hauptsächlich Plutonium (0,93 %; $T_{1/2}=24.000$ a); dazu Neptunium, Americium, Curium, Berkelium, Californium (zusammen 0,06 %; $T_{1/2}=400$ bis $15.000.000$ a)

Umstellung auf LEU:

Aktuell forschen am FRM II 15 ca. Personen an neuem Brennstoff. Es werden momentan drei Forschungspfade verfolgt: U-Mo in Aluminiummatrix, U-Mo monolithisch, Dichteerhöhung des aktuellen Brennstoffs U_3Si_2

Bis jetzt gibt es international kein Beispiel für die erfolgreiche Umrüstung einer Hochflussquelle (nur kleinere Reaktoren)



(Zu den Systemen im Detail, siehe folgende Folien)

Gesamtwärmeabfuhr: 22,9 MW, davon...

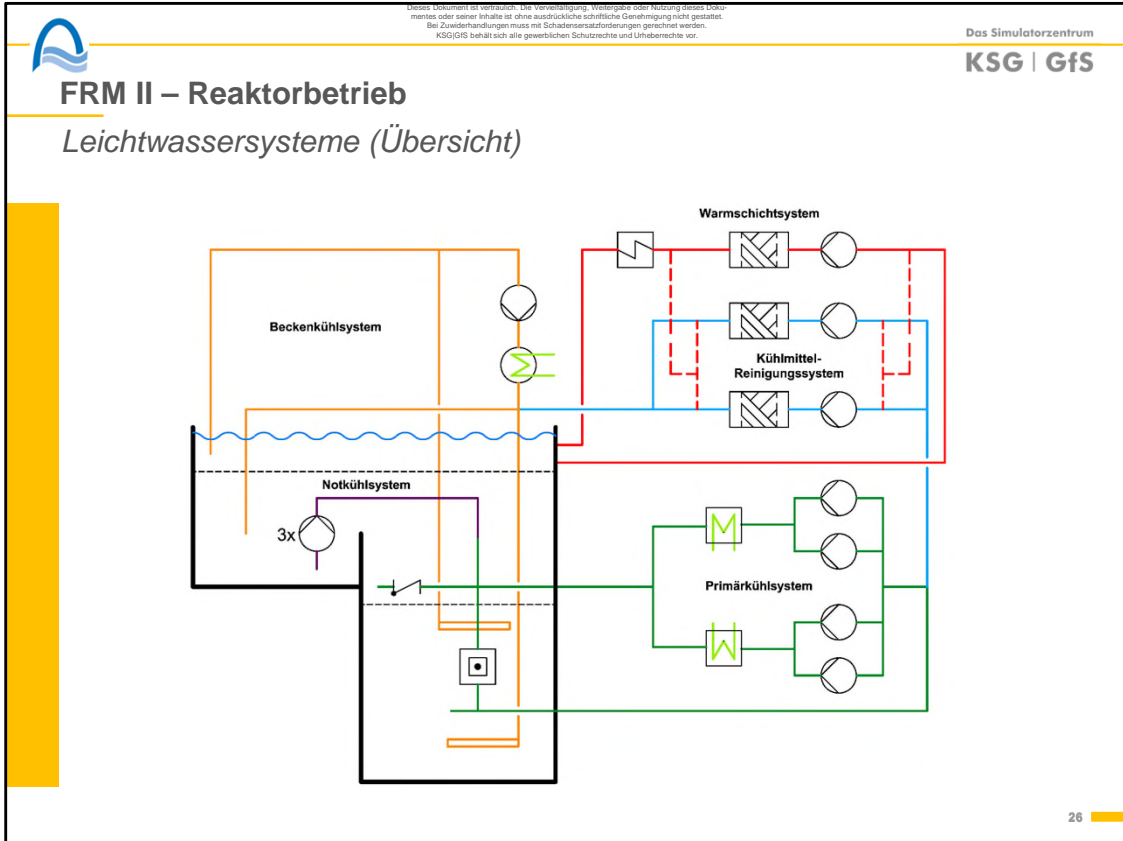
- 19 MW aus Primärkühlsystem
- 1,6 MW aus Moderatorkühlsystem
- 1,3 MW aus Beckenkühlsystem

Höchsttemperaturen:

- Primärkreis: 53 °C
- Sekundärkreis: 35 °C
- Tertiärkreis: 25 °C

Bei Ausfall aller Kühlsysteme: RESA, Beckenwasser nimmt Nachzerfallswärme auf (Temperatur bleibt unter 80 °C).

Falls die Frage kommt: Das Kühlwasser stammt nicht aus der Isar! Die geringen Wasserverluste aus dem Kühlturm an die Umgebung (Schwaden) werden mit Brunnenwasser ergänzt.



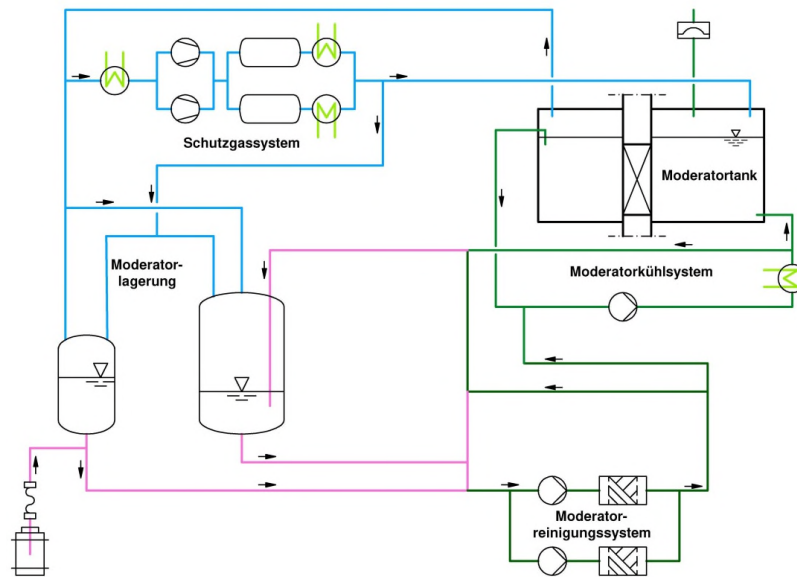
Übersicht der Leichtwassersysteme für Interessierte:

- Primärkühlkreis führt Wärme aus Brennelement ab (300 kg/s, 37 °C -> 53 °C)
- Notkühlsystem läuft nach RESA an und führt Wärme aus Brennelement ins Reaktorbecken ab, falls Primärpumpen nicht verfügbar sind (läuft 3 h)
- Beckenkühlsystem führt Wärme aus Reaktorbecken und Absetzbecken ab
- Kühlmittel-Reinigungssystem entfernt Verunreinigungen aus dem Kühlmittel
- Wärmeschichtsystem erzeugt einen „Deckel“ aus Warmwasser auf Reaktor- und Absetzbecken (ca. 5 °C wärmer als Beckenwasser)



FRM II – Reaktorbetrieb

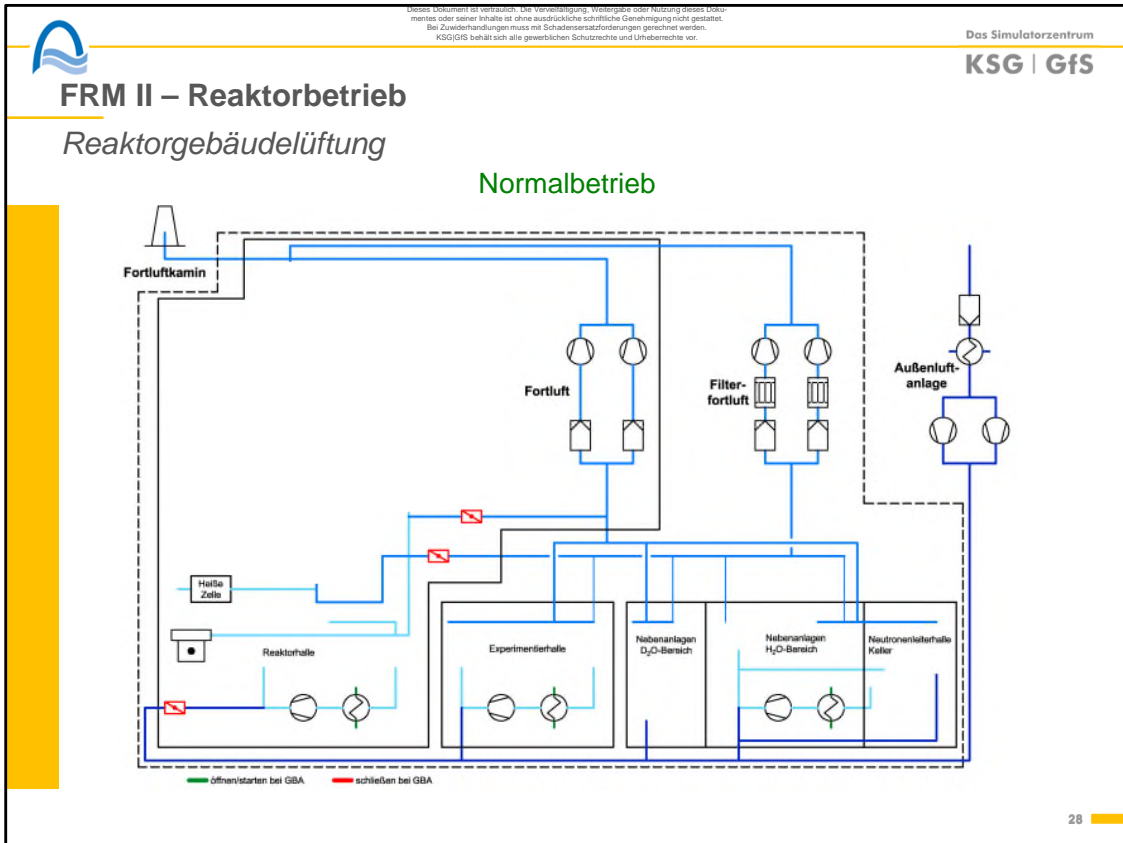
Schwerwassersysteme (Übersicht)



27

Übersicht der Schwerwassersysteme für Interessierte:

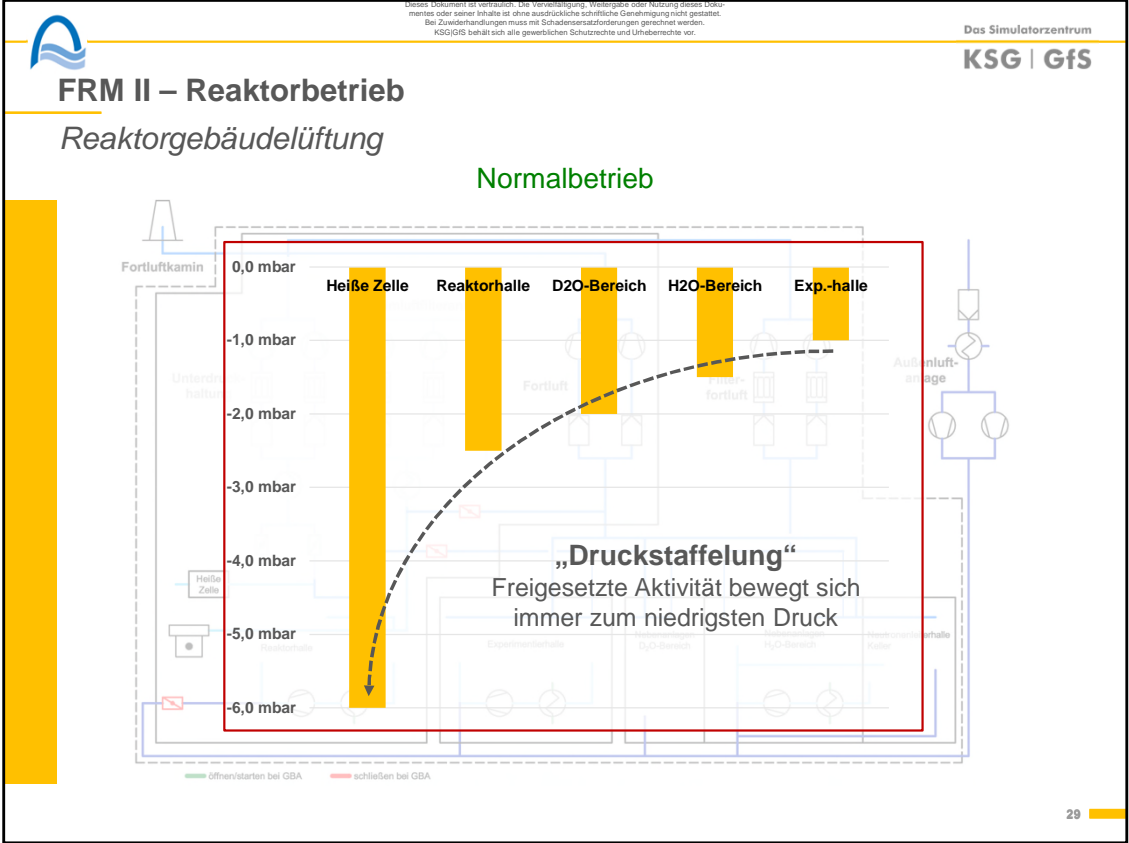
- Moderatorortank umschließt den Moderator im Reaktor
- Moderatorkühlsystem führt Wärme aus Moderatorortank ab
- Moderatorreinigungssystem entfernt Verunreinigungen aus dem Moderator
- Moderatorlagerung lagert Schwerwasserreserve und nimmt bei Entleerung Moderatorortankinhalt auf
- Schutzgassystem spült Gasräume in Moderatorortanks (Tritium!) und rekombiniert Wasserstoff



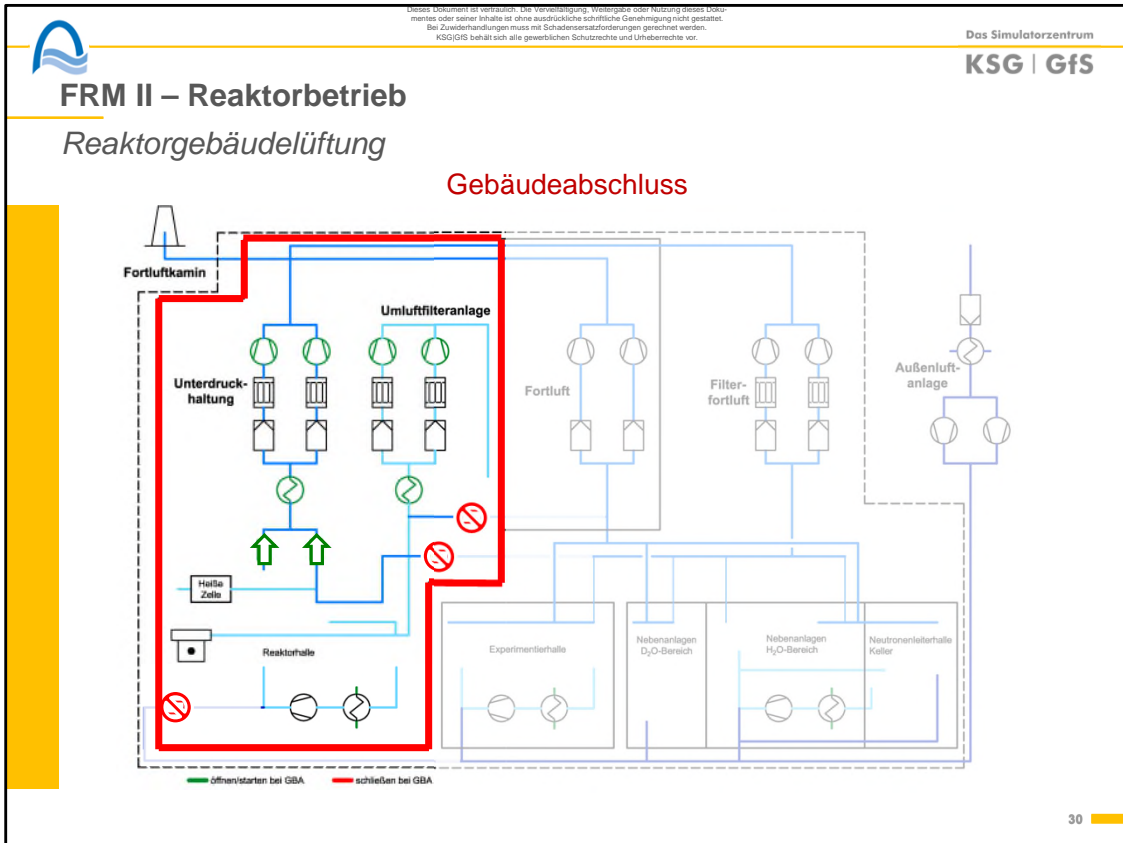
Im Normalbetrieb ist die Lüftung des Kontrollbereichs mit anderen Industrieanlagen vergleichbar.

Zwei Besonderheiten:

- Einziger Abluftweg ist der Kamin mit umfassender Aktivitäts-Instrumentierung
- Zweites paralleles Fortluftsystem („Filterfortluft“) mit Aktivkohlefiltern



Unterdruck ist gut wahrnehmbar an den Türen zur Reaktorhalle!



Bei Gefahr von Aktivitätsfreisetzung in der Reaktorhalle wird diese lüftungstechnisch isoliert (sog. „Gebäudeabschluss“). Gleichzeitig laufen eigene Systeme zur Unterdruckhaltung und Filterung im isolierten Bereich an.

Weiterführende Details für Interessierte zum Gebäudeabschluss:

- Normale Zu- und Abluftsysteme werden von der Reaktorhalle getrennt (somit müsste es eigentlich „Reaktorhallenabschluss“ heißen)
- Alle Lüftungssysteme laufen weiter
- Start Unterdruckhaltung: führt Luft aus Reaktorhalle über Aktivkohlefilter zum Kamin ab um Unterdruck zu halten
- Start Umluftanlage: Filtert Luft in der Reaktorhalle
- Auslösung des GBA:
 - hohe ODL an der Beckenkronen (Reaktorschutz)
 - hohe N-16-Aktivität im Primärkreis (Reaktorschutz)
 - Taster in der Warte (von Hand)



FRM II – Reaktorbetrieb

Energieversorgung

Der FRM II hat mehrere Möglichkeiten der Energieversorgung:

- **20 kV-Normalnetz** des Forschungscampus (Normalfall)
- **20 kV-Notnetz** des Forschungscampus (manuelle Zuschaltung bei längerem Ausfall des Normalnetzes)
- Zwei redundante **400 V-Diesel** (starten bei Netzausfall, versorgen Sicherheitssysteme und Leittechnik)
- Diverse **24 V- und 220 V-Batterien** (Versorgung der Leittechnik und der Notkühlpumpen, wenn Diesel nicht verfügbar sind)

Wichtig: Der FRM II ist kein elektrischer Selbstversorger!
Er besitzt weder einen Turbinensatz, noch ist er technisch in der Lage, den dafür nötigen Dampf zu erzeugen.

Forschungsreaktoren besitzen GENERELL keine Dampfturbinen und benötigen sie auch nicht.

Erläuterung für Interessierte:

- Eine Eigenversorgung wäre aufgrund des intermittierenden Betriebs (Zykluslänge nur 60 Tage) nicht wirtschaftlicher als eine Netzversorgung. Tatsächlich würde sie durch den höheren technischen und personellen Aufwand wahrscheinlich sogar deutlich mehr kosten.
- Eine Dampfturbine würde die Fähigkeit zur Dampferzeugung bedingen, was weitaus höhere Betriebstemperaturen und -drücke verlangt. Diese würden den notwendigen Aufwand für die Reaktorsicherheit (v.a. Notkühlung und Druckbegrenzung) exponentiell erhöhen. Außerdem würde dafür ein geschlossenes, druckfestes Reaktordesign benötigt, was die Möglichkeiten für Bestrahlungen und Neutronenauskopplung stark einschränkt bzw. kompliziert.



FRM II – Reaktorbetrieb

Leittechnik

Betriebliche Leittechnik:

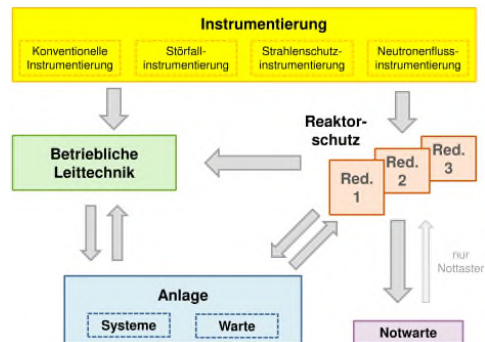
Regelt und überwacht alle Systeme des FRM II. Entspricht dem Standard für großtechnische Anlagen.

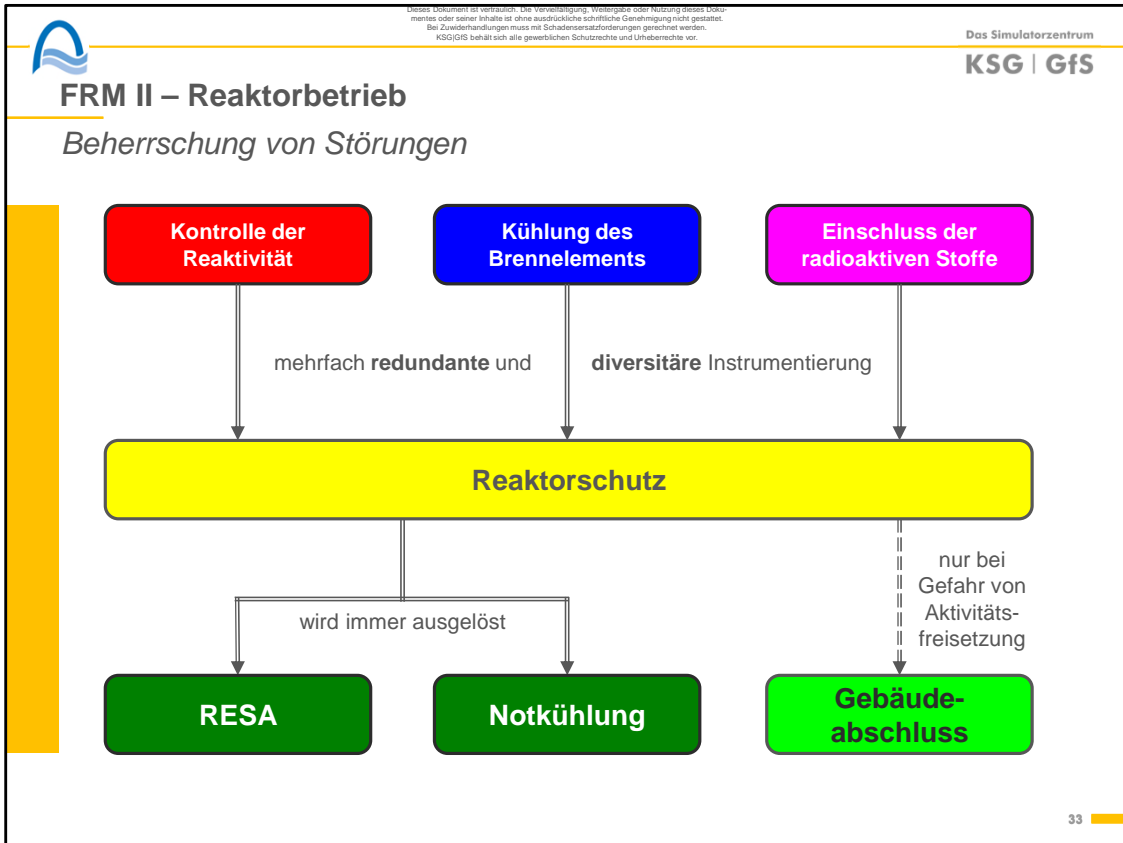
Reaktorschutzsystem:

Vollautomatisches und mehrfach redundantes System. Schaltet bei Störungen den Reaktor ab und aktiviert die Sicherheitssysteme.

Prozessleitsystem:

Bedienung und Messwertverfolgung durch das Schichtpersonal.





Wichtige Begriffe:

- „redundant“ = mehrfach vorhanden, so dass bei Ausfall einer Redundanz die Aufgabe immer noch erfüllt werden kann
- „diversitär“ = mehrfach vorhanden, wobei möglichst wenig gemeinsam ist (z.B. unterschiedliches Wirkprinzip oder Hersteller)

Redundanz/Diversität der Maßnahmen am FRM II:

- RESA: 2-fach diversitär (Regelstab und 4v5 Abschaltstäbe)
- Notkühlung: 3-fach redundant (3x 100 %-Notkühlpumpen) plus Diversität durch Naturumlauf
- GBA: 2-fach redundant (2x Absperrarmatur an jeder Absperrstelle, KLA40/60 mit je 2x 100 %-Strängen)



FRM II – Reaktorbetrieb

Genehmigte Abgabewege an die Umwelt

Der FRM II gibt minimale Mengen von Aktivität an seine Umgebung ab. Dies geschieht auf zwei Wegen:

➤ **Luftweg:**

Abluft alle Lüftungsanlagen im Kontrollbereich geht über Kamin mit umfangreicher Instrumentierung (Aerosole, Edelgase, Tritium, C-14, Jod). Abgabe auf anderen Wegen ist wegen Druckstaffelung ausgeschlossen.

➤ **Wasserweg:**

Reinigung aller Abwässer über Harzfilter. Anschließend Beprobung durch Betriebschemie (radiologische und chemische Parameter). Erst bei Nachweis unbedenklicher Werte Abgabe in die Isar.

Theoretische Jahresdosis durch diese Abgaben beträgt **3 μ Sv**, entsprechend der Hälfte einer einfachen Röntgenaufnahme (Hand, Zahn).

JEDE nukleare oder radiologische Einrichtung gibt Aktivität an die Umgebung ab, allerdings werden nur kerntechnische Anlagen so streng überwacht!

Typische Dosen durch Röntgenaufnahme:

- Hand/Fuß/Zahn: 5 μ Sv
- Lunge: 30 μ Sv
- Kiefer: 200 μ Sv
- Mammographie: 500 μ Sv
- Innere Organe: 1.100 μ Sv
- Lendenwirbelsäule: 1.500 μ Sv
- Ganzkörper-CT: 14.000-20.000 μ Sv



FRM II – Reaktorbetrieb

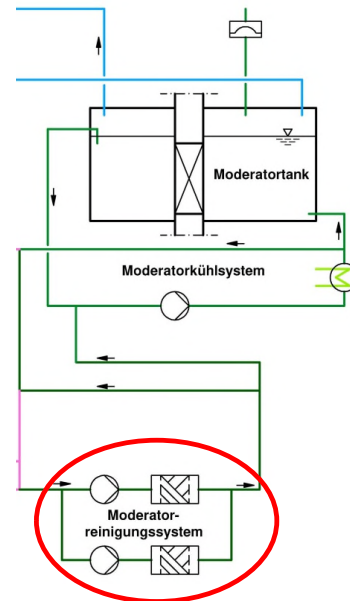
C-14-Ereignis

Hintergrund:

- Turnusmäßiger Tausch von Filterharzen in der Moderatorreinigung.
- Harze werden zur Entladung vakuumgetrocknet.
- Mobile Vakuumtrocknungsanlage wird für verschiedene Aufgaben benutzt, daher ist CO₂-Filter nicht immer montiert.

C-14:

- Natürliches Radioisotop (β , 156 keV), entsteht durch kosmische Bestrahlung von N-14.
- Entsteht auch im Neutronenfeld des Reaktors aus dem O-17 im Wasser (0,04 % nat. Anteil).
- Sehr kleine Menge in Abluft-CO₂ (<10 ppb), daher nur Sammelmessung (Bilanzierung) möglich. Auswertung erfolgt quartalsweise.



35

Massenanteil von C-14 im natürlichen Kohlenstoff ca. 10 ppb.

C-14 wird wissenschaftlich zur Altersbestimmung organischer Materialien genutzt (Radiokarbonmethode).



FRM II – Reaktorbetrieb

C-14-Ereignis

Ereignis:

- Aufgrund eines Missverständnisses wird der CO₂-Filter nicht montiert.
- Trocknungsabluft mit C-14 wird an Kamin abgegeben (ca. 200 cm³).
- Fehler wird am Ende der 5-tägigen Trocknungsphase erkannt. Anschließend wird Filter für zweite Trocknungsphase montiert.
- Zahlenwerte:
 - Abgabe C-14 durch FRM II: $2,3 \cdot 10^{10}$ Bq
 - Genehmigter Jahreswert FRM II: $2,0 \cdot 10^{10}$ Bq
 - Jahresgrenzwert laut StrSchV: $10,0 \cdot 10^{10}$ Bq
- Einstufung INES 1 „Störung“, da Überschreitung des Genehmigungswertes

Konsequenzen:

- Schulungen zur Fehlervermeidung.
- Neue Vakuumtrocknungsanlage mit fest montiertem CO₂-Filter.

Für die Abgabe von C-14 durch Privatpersonen gilt der Wert aus der StrSchV, also weit mehr, als die vom FRM II abgegebene Menge!



FRM II – Reaktorbetrieb

Status des FRM II

- 3/19-12/19** Stillstand wegen Unverfügbarkeit von Brennelementen. Die BE waren zwar gefertigt worden, der Transport wurde aber wegen Unstimmigkeiten zwischen dt. und frz. Behörden lange Zeit nicht genehmigt.
- 1/20-4/20** Betrieb für einen Zyklus (60 Tage) mit anschließender Wartungspause
- 5/20-2/21** „C-14-Ereignis“; keine Wiederanfahrgenehmigung bis zur Umsetzung von mit der Behörde abgestimmten Maßnahmen
- 3/21-12/21** Wiederanfahren abgebrochen aufgrund unzureichender Kühlung der Kalten Quelle. Die Ursache (ein defekter Cd-Absorber) wurde in **8/21** identifiziert. Die Kalte Quelle wurde in **12/21** ausgebaut, um den FRM II vorläufig ohne sie weiterzubetreiben.
- 1/22** Identifikation einer H₂O-Leckage am Kompensator des Zentralkanals. Bis zur Verfügbarkeit eines Ersatzteils verbleibt der Reaktor im Stillstand. Ein Wiederanfahren vor 2023 wurde inzwischen ausgeschlossen.

PAUSE



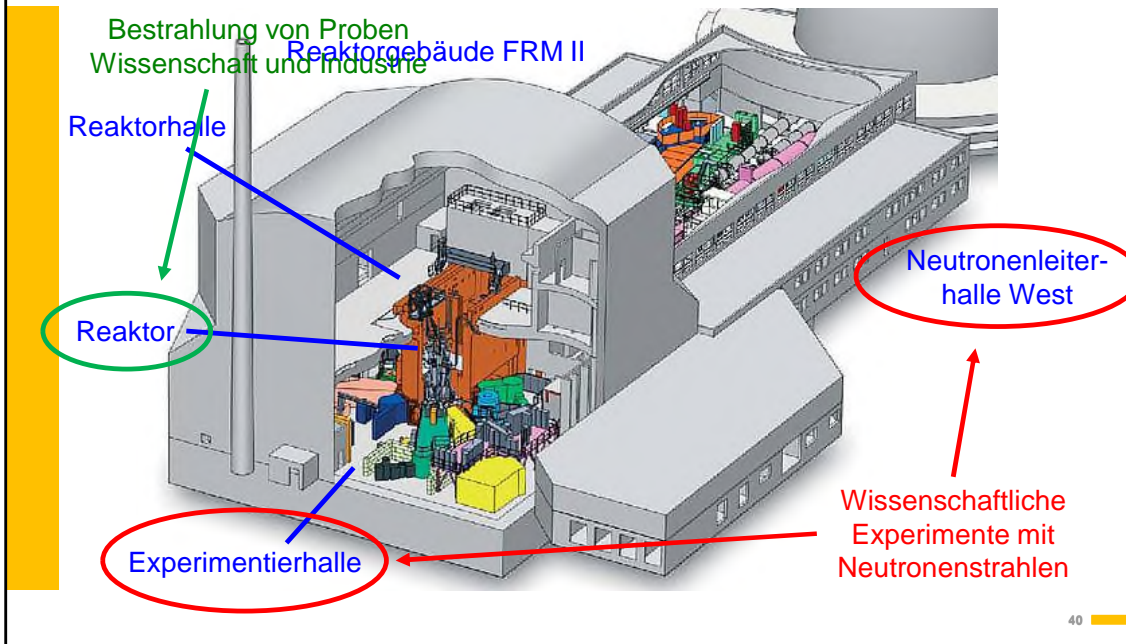
Einführung für Besucherführer

FRM II – Wissenschaft



FRM II – Wissenschaft

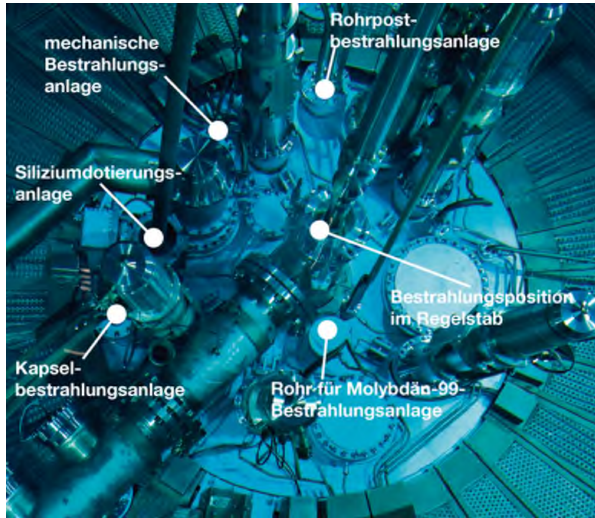
Gebäudeübersicht - Wissenschaft





FRM II – Wissenschaft

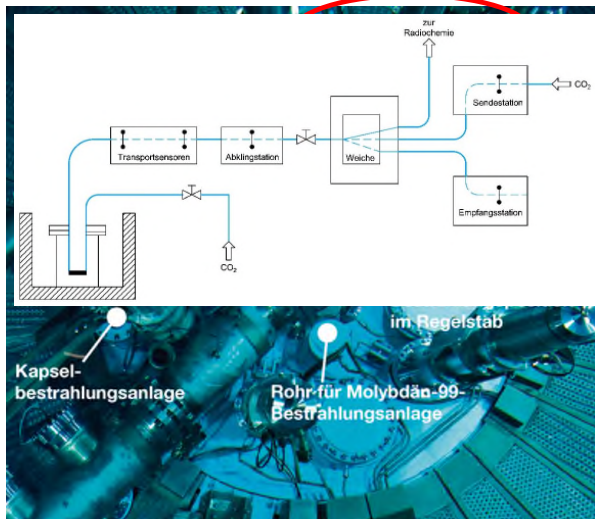
Bestrahlung von Proben





FRM II – Wissenschaft

Bestrahlung von Proben



Rohrpost- bestrahlungsanlage

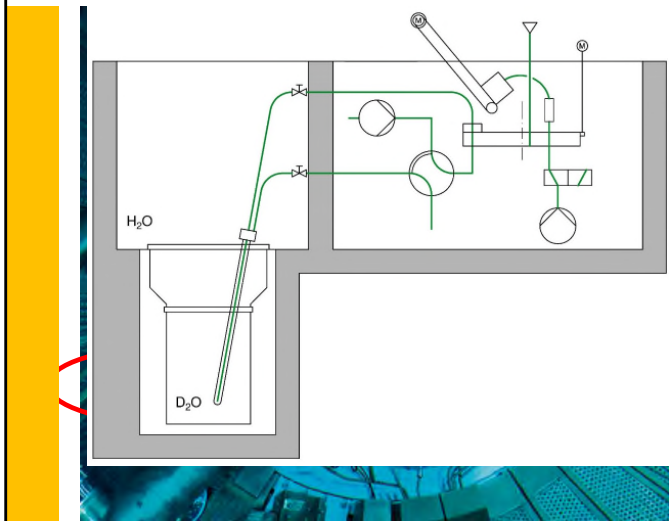
- 6-strängiges Rohrsystem
- Transport mittels CO₂
- pro Strang kann eine Probe bestrahlt werden
- direkter Weitertransport zur Radiochemie möglich
- z.B. für NAA (Neutronenaktivierungsanalyse) oder Erzeugung von Ho-166

Beispielbild für einen Strang.

Nutzen von Ho-166: Therapie von Lebertumoren; $T_{1/2}=27$ h! (Just-in-Time-Produktion)

Merkmale Rohrpostanlage:

- hohe Transportgeschwindigkeit, daher für Kurzzeitbestrahlungen geeignet
- keine Kühlung, daher nicht für wärmeentwickelnde Proben
- unabhängige Einbringung und Rückholung pro Strang



Kapsel- bestrahlungsanlage

- 2-strängiges Rohrsystem
- Transport mittels Wasser
- pro Strang können drei Proben bestrahlt werden
- Einbringung von Proben separat möglich, Rückholung immer gemeinsam pro Strang
- z.B. Erzeugung von Lu-177

Beispielbild für einen Strang auf der Reaktorseite.

Nutzen von Lu-177: Therapie von Darm- und Prostata Tumoren; $T_{1/2}=7$ d (z.B. durch ITM)

Merkmale Kapselbestrahlungsanlage:

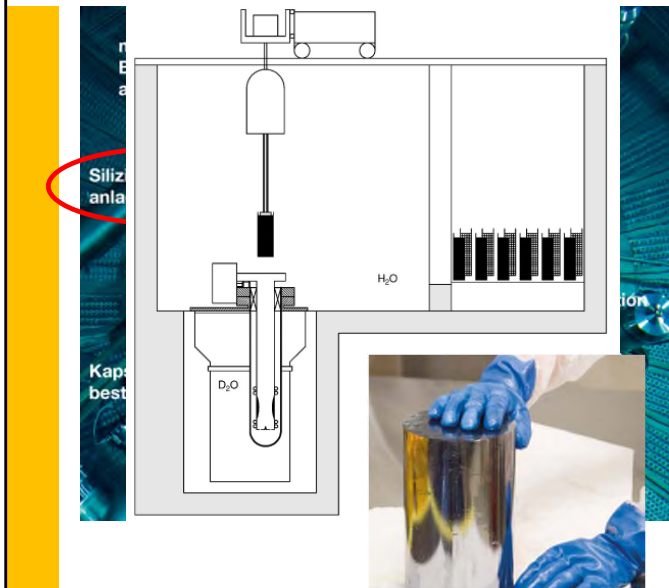
- niedrigere Transportgeschwindigkeit, daher eher für Langzeitbestrahlungen
- permanente Kühlung durch Wasserstrom, daher für wärmeentwickelnde Proben geeignet
- getrennte Einbringung, aber nur gemeinsame Rückholung pro Strang

Karussell und Entladevorrichtung sind gemeinsam für beide Stränge.



FRM II – Wissenschaft

Bestrahlung von Proben



Silizium-dotierungsanlage

- Dotierung von Silizium-Einkristallen (bis 36 kg) durch Neutronenstrahlung
- Wird mit Winde in den Moderatortank abgesenkt
- Kristall wird ständig gedreht, um homogene Dotierung zu erzielen
- Einsatz in Supercomputern oder HGÜ-Umrichtern

44

Jährlich dotierte Menge: maximal 15 t (~10 % des Weltmarktes)

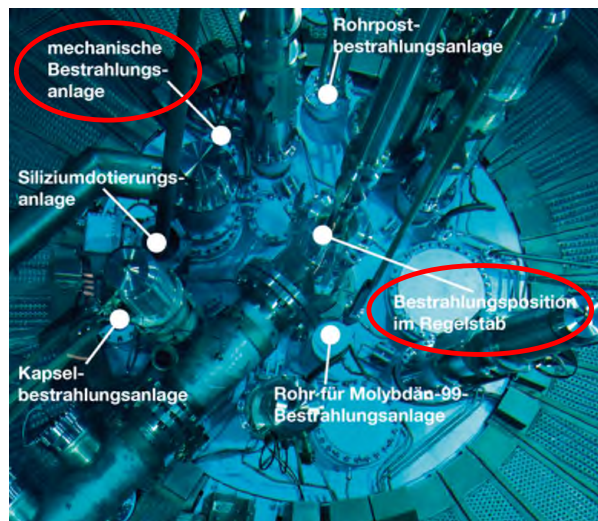
Warum Dotierung im Reaktor?

- Nur so hochgradig homogene und praktisch defektfreie Dotierung möglich.
- Wichtig für großvolumige Bauteile (sonst zu hoher Ausschuss) und Bauteile im hohem Leistungsdurchgang (erhöhte Wärmeentwicklung an Fehlstellen).
- Beispiele: Prozessoren für Hochleistungsrechner, Transistoren für HGÜ-Umrichter (HGÜ=Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung).
- Für andere Bauteile ist chemische Dotierung deutlich billiger.



FRM II – Wissenschaft

Bestrahlung von Proben



Mechanische Bestrahlungsanlage

- Probe wird manuell an einer „Angelschnur“ in den Moderatortank abgesenkt und nach vorgegebener Zeit wieder herausgeholt, z.B. für Archäometrie (Altersbestimmung von Fossilien)

Bestrahlungsposition im Regelstab

- Probe wird fest im Regelstab montiert und über den ganzen Zyklus bestrahlt

45

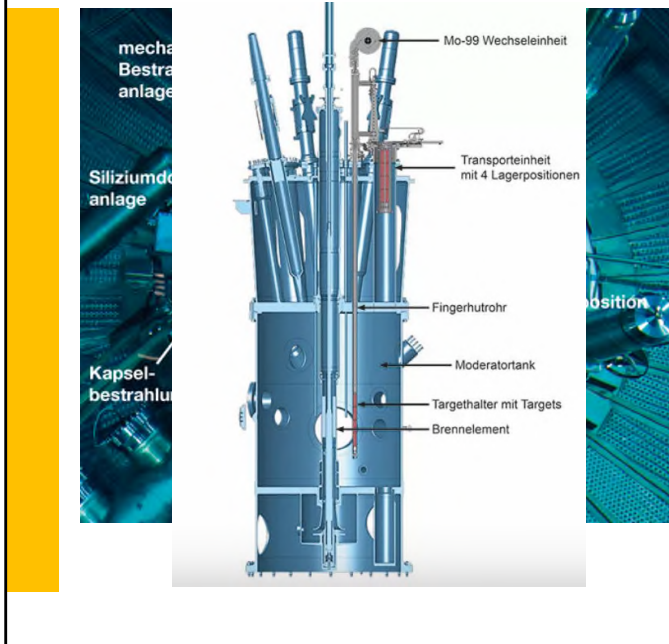
Mechanische Bestrahlung am FRM II ist ideal für Archäometrie wegen des günstigen Verhältnisses N_{th}/N_s (benötigt wird >100 , besser sogar >1000).

An der Bestrahlungsposition im Regelstab lassen sich pro Zyklus Neutronenfluenzen bis $1,1 \cdot 10^{21} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ erreichen. Wird allerdings nur selten genutzt.



FRM II – Wissenschaft

Bestrahlung von Proben



Molybdän-99- Bestrahlungsanlage

- Aktuell laufendes Projekt
- Ziel: Erzeugung von Molybdän-99 als Vorstufe für Technetium-99m
- Tc-99m ist wichtiges Isotop in der Nuklearmedizin (v.a. Krebserkennung)
- Versorgungslage ist weltweit kritisch, da es nur wenige Hersteller gibt (aktuell 6)

46

Mo-99 zerfällt mit einer Halbwertszeit von 66 h zu Tc-99 (14%) und Tc-99m (86%).

Tc-99m wiederum zerfällt mit einer Halbwertszeit von 6 h zu Tc-99. Die dabei entstehende Gamma-Emission von ca. 140 keV wird zur Krebsdiagnostik bei verschiedenen Organen verwendet. Durch die kurze Halbwertszeit ist die Belastung für den Patienten dabei gering. Jährlich ca. 30 Mio. Anwendungen.

Erzeugung von Mo-99 derzeit ausschließlich an Forschungsreaktoren möglich (Spaltprodukt des U-235).

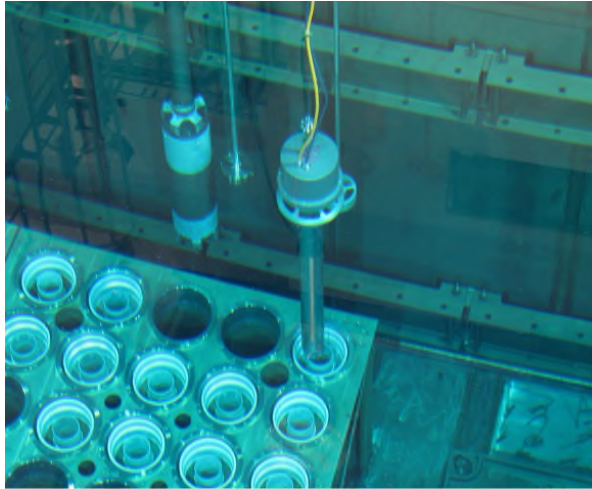
Alternative Erzeugungswege über Beschleuniger (aus Mo-100) sind noch in der Erforschung.

Planung FRM II: Genehmigung für Bau und Betrieb im August 2022 erteilt, Baubeginn Kühlsystem im Oktober 2022, Inbetriebnahme für Anfang 2025 erhofft



FRM II – Wissenschaft

Bestrahlung in abgebrannten Brennelementen



Gamma- Bestrahlungsanlage

- Erfolgt in abgebrannten Brennelementen, d.h. auch im Stillstand des Reaktors.
- Aktuelle Forschung: Auswirkung von γ -Strahlung auf Gesteine und Baustoffe fur die Endlagerung

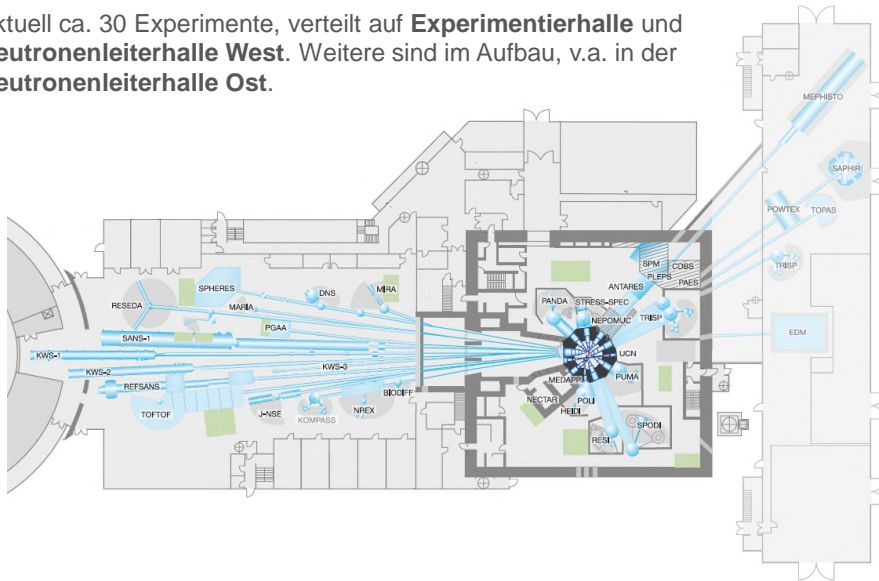
Die Gammabestrahlung ist aktuell trotz Reaktorstillstand in Betrieb!



FRM II – Wissenschaft

Experimente mit Neutronen

Aktuell ca. 30 Experimente, verteilt auf **Experimentierhalle** und **Neutronenleiterhalle West**. Weitere sind im Aufbau, v.a. in der **Neutronenleiterhalle Ost**.





FRM II – Wissenschaft

Experimente mit Neutronen



Neutronenleiterhalle West



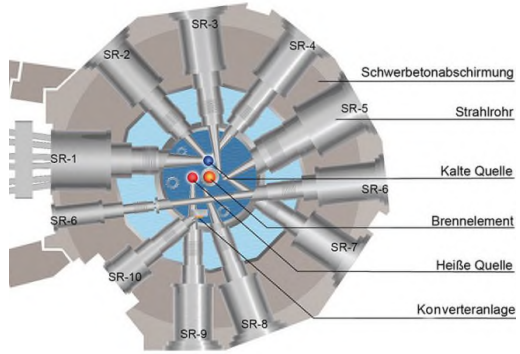
Experimentierhalle

Dieses Dokument ist vertraulich. Die Vervielfältigung, Weitergabe oder Nutzung dieses Dokuments oder seiner Inhalte ist ohne ausdrückliche schriftliche Genehmigung nicht gestattet. Bei Zuwiderhandlungen muss mit Schadensersatzforderungen gerechnet werden. KSG/GfS behält sich alle gewerblichen Schutzrechte und Urheberrechte vor.

Das Simulazentrum
KSG | GfS

FRM II – Wissenschaft

Strahlrohre



Am FRM II erzeugte Neutronen:

- **Spaltneutronen – ca. 1,9 MeV**
Direkt im Kern oder in der Konverteranlage
➔ *1/15 der Lichtgeschwindigkeit*
- **Heiße Neutronen – 0,1-1 eV**
In der Heißen Quelle
➔ *Erdbebenwelle / Erdeintritt Apollo*
- **Thermische Neutronen – 25 meV**
Im Moderator
➔ *Geostationärer Satellit*
- **Kalte Neutronen – 2 meV**
In der Kalten Quelle
➔ *2-fache Schallgeschwindigkeit / Concorde*

50

Geschwindigkeitsvergleich:

Spaltneutronen:

Stern beim Sturz in ein schwarzes Loch bzw. 1/15 der Lichtgeschwindigkeit

Heiße Neutronen:

Erdbebenwelle (0,1 eV) bzw. Wiedereintrittsgeschwindigkeit einer Apollo-Kapsel (1 eV, höchste Geschwindigkeit eines bemannten Objekts bei Apollo 10)

Thermische Neutronen:

Geostationärer Satellit (3,08 km/s)

Kalte Neutronen:

2-fache Schallgeschwindigkeit (Concorde, modernes Kampfflugzeug)

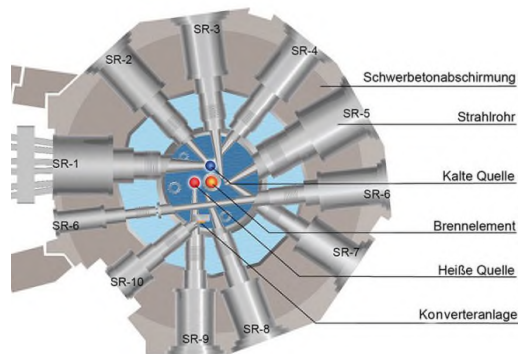
Ultrakalte Neutronen:

Radfahrer



FRM II – Wissenschaft

Strahlrohre



Auskopplung aus dem Reaktor über 12 Strahlrohre, davon...

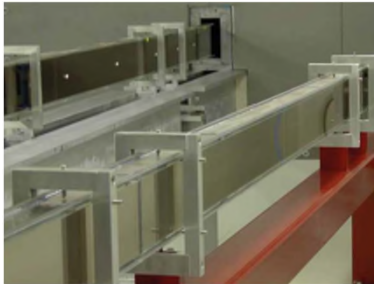
- ... 10 waagerechte Strahlrohre auf der Ebene des Brennelements
 - 3 auf die KQ gerichtet (1/2/4)
 - 1 auf die HQ gerichtet (9)
 - 1 mit Strahlkonverteranlage (10)
 - 1 quer durch den Moderatortank (6)
 - 4 sonstige (3/5/7/8)
- ... 2 schräg von oben (42° zur Ebene, (11/12))

Alle Strahlrohre sind tangential zum Kern, so dass sie nur Neutronen der gewünschten Energie „sehen“.



FRM II – Wissenschaft

Neutronenleiter



Neutronenleiter:

- leiten Neutronen vom Reaktor zu den Experimenten
- innen mehrschichtig mit Ni-Ti-Sandwich-Beschichtung „verspiegelt“
- Totalreflexion mit max. 5° Einfallswinkel
- außen mit Polyethylen und Blei abgeschirmt
- können Neutronenstrahlen fokussieren, defokussieren und aufteilen
- transportieren am FRM II Neutronen über Distanzen bis 70 m
- erster Neutronenleiter 1965 von Heinz Maier-Leibnitz am FRM realisiert

Neutronenleitung funktioniert umso besser, je „kälter“ die Neutronen sind. Darum sind alle Experimente mit höherenergetischen Neutronen nahe am Reaktor aufgebaut, der Rest kann auch etwas weiter weg sein.

Die ersten Neutronenleiter von Maier-Leibnitz hatten noch Kupferbeschichtung und waren nur für kalte Neutronen geeignet.

Einfache Ni-58-Beschichtung → Totalreflexion bei $<0,5^\circ$
Sandwich-Beschichtung → Totalreflexion bei bis zu 5°

Abhängig von der Wellenlänge, obige Winkel für kalte Neutronen.

Wer's genau will: Grenzwinkel = $0,1^\circ \times \text{Wellenlänge} \times \text{Zahl der Sandwich-Schichten}$

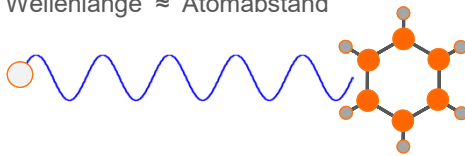


FRM II – Wissenschaft

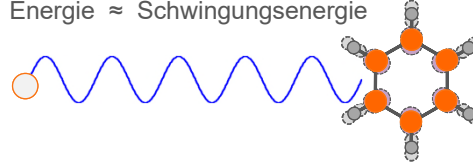
Warum Neutronenquelle?

- Als ungeladene Teilchen haben Neutronen eine hohe Eindringtiefe in die Probe.
- Die Eigenschaften (Wellenlänge/Energie) von kalten und thermischen Neutronen entsprechen denen der typischen Untersuchungsobjekte. Daher können Veränderungen dieser Größen besonders gut gemessen werden.

Wellenlänge \approx Atomabstand



Energie \approx Schwingungsenergie





FRM II – Wissenschaft

Warum Neutronenquelle?

- Als ungeladene Teilchen haben Neutronen eine hohe Eindringtiefe in die Probe.
- Die Eigenschaften (Wellenlänge/Energie) von kalten und thermischen Neutronen entsprechen denen der typischen Untersuchungsobjekte. Daher können Veränderungen dieser Größen besonders gut gemessen werden.
- Neutronen haben einen Spin, aber keine elektrische Ladung. Daher sind sie ideal zur Untersuchung magnetischer Strukturen oder Dynamiken!
- Neutronen lösen Kernreaktionen aus, deren charakteristische Strahlung Informationen über den Ausgangskern gibt.



Der saure Apfel:

Die für aktuelle Forschung notwendigen Neutronendichten können ausschließlich an **Hochflussreaktoren** oder **Spallationsquellen** erreicht werden. Beide erzeugen hochradioaktiven Abfall (Brennelemente bzw. Targets), letztere haben zusätzlich einen enormen Energiebedarf.

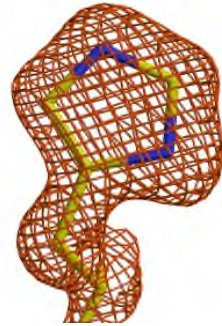
Neutronen haben Spin, aber elektrisch neutral → wirken wie ein winziger Kompass, z.B. zum Ausmessen von Magnetfeldern

Spallationsquelle:

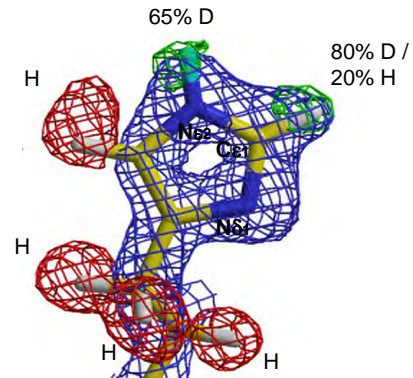
Spezialisierter Teilchenbeschleuniger, der Teilchen (meist Protonen) mit sehr hohen Energien (ab 500 MeV) auf ein Target (meist aus Quecksilber oder Blei) schießt. Die Atomkerne im Target nehmen dabei so viel Energie auf, dass sie „verdampfen“ und dabei Neutronen abgeben. Spallationsquellen können gepulst oder kontinuierlich sein.

Bekannt ist die Spallationsquelle SINQ in Villingen/Schweiz mit einem kontinuierlichen Neutronenfluss von 10^{14} .

In Lund/Schweden wird aktuell die European Spallation Source (ESS) gebaut, die mit gepulsten 2 GeV-Protonen Neutronenflüsse von 10^{18} erreichen soll (geplante Fertigstellung 2025).



Röntgendiffraktion
bei 1,5 Å Auflösung



Neutronendiffraktion
bei 1,5 Å Auflösung

Beispiel dafür, was Neutronen besser als Röntgenstrahlung können.

Deuterierung ist ausschließlich mit Neutronen sichtbar: Gezielte Deuterierung zur Verfolgung von Reaktionsprozessen!



FRM II – Wissenschaft

Wissenschaftliche Verfahren am FRM II

Übersicht der Verfahren:

- Bildgebende Verfahren
- Neutronenstreuung
 - Neutronendiffraktometrie
 - Neutronenspektroskopie
- Aktivierungsanalyse
- Positronenquelle
- Medizinische Bestrahlung

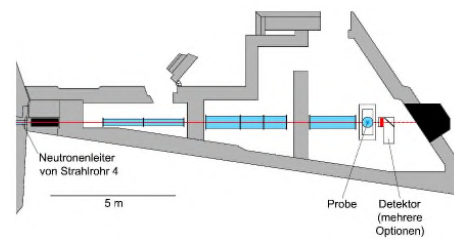


Bildgebende Verfahren („Imaging“)
Durchleuchtung von Proben mit Neutronen. Durch unterschiedlich starke Absorption entstehen 2D-Bilder.

Experimente am FRM II:

- ANTARES ↳ Kalte Neutronen
- NECTAR ↳ Spaltneutronen / Thermische Neutronen

Beispiel ANTARES:



Funktioniert wie Röntgenaufnahme, aber mit höherer Eindringtiefe



Bildgebende Verfahren („Imaging“)
Durchleuchtung von Proben mit Neutronen. Durch unterschiedlich starke Absorption entstehen 2D-Bilder.

Beispiele für Forschung am FRM II:

- Feuchtigkeit in Isolationsmaterialien aus der Luftfahrt (ANTARES)
- Dynamische Beobachtung der Abläufe bei der Gefriertrocknung (ANTARES)
- Dynamische Beobachtung der Ölverteilung in einem laufenden Motor (ANTARES)
- Vermessen von Knochen in versteinerten Dinosaurier-Eiern (NECTAR)
- Wassertransport in Pflanzen durch Kapillarkräfte (NECTAR)

- Feuchtigkeit in Isolationsmaterialien aus der Luftfahrt: kritische Relevanz für Flugbetrieb, denn Feuchtigkeit verursacht Zusatzgewicht, beschädigt Isolierung und erzeugt Kurzschlüsse
- Vermessen von Knochen in versteinerten Dinosaurier-Eiern: Zeigt Parallelen zu heutigen eierlegenden Tieren, Embryonen entwickeln sich zeitlich versetzt wie bei Vögeln, nicht gleichzeitig wie bei Reptilien



Neutronenstreuung

Änderung der Flugrichtung und/oder Energie von Neutronen beim Durchgang durch Materie. Die Änderung ist dabei sowohl von den Eigenschaften des Neutrons, als auch von denen der Materie abhängig.

Neutronendiffraktometrie
Messung der Richtungsverteilung von Neutronen nach elastischer Streuung an Materie.

Neutronenspektroskopie
Messung der Energie- und Richtungsverteilung von Neutronen nach inelastischer Streuung an Materie.

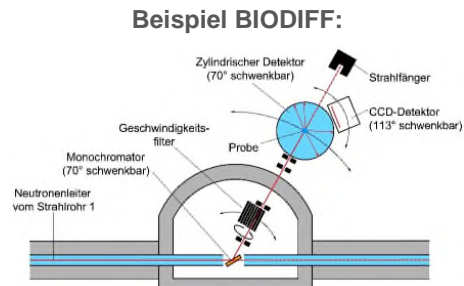
Typischerweise wird mit monoenergetischen Neutronen gemessen.



Neutronendiffraktometrie
Messung der Richtungsverteilung von Neutronen nach elastischer Streuung an Materie.

Experimente am FRM II:

- SPODI
 - STRESS-SPEC
 - RESI
 - HEiDi
 - POLI
 - BIODIFF
 - MARIA
 - NREX
 - REFSANS
 - SANS-1
 - KWS-1/-2/-3
- Diffraktometer
- Reflektometer
- Kleinwinkel-diffraktometer



Neutronendiffraktometrie liefert immer Momentaufnahmen eines Zustandes in der Probe

Gute Messergebnisse verlangen eine hohe Periodizität, daher werden meist Kristalle als Probe genutzt (bereits existierend oder zuvor gezüchtet).

Reflektometer untersuchen reflektierte Neutronen nach der gleichen Methode, was besonders gut für die Untersuchung von dünnen Schichten funktioniert.

Kleinwinkeldiffraktometer („Kleinwinkelstreuanlagen“) dienen der Untersuchung besonders großer Strukturen.

Je nach Struktur der Proben (monokristallin oder polykristallin) wird zwischen Einkristalldiffraktometer und Pulverdiffraktometer unterschieden.



Neutronendiffraktometrie

Messung der Richtungsverteilung von Neutronen nach elastischer Streuung an Materie.

Beispiele für Forschung am FRM II:

- Beobachtung der Alterung von Lithium-Ionen-Batterien (SPODI)
- Sichtbarmachen von Spannungen in Eisenbahnschienen (STRESS-SPEC)
- Aufklärung des Mechanismus, durch den Bakterien resistent gegen Antibiotika werden (BIODIFF)
- Verbesserung der „Verpackung“ von mRNA-Wirkstoffen (KWS-2)

- Beobachtung der Alterung von Lithium-Ionen-Batterien: Ermöglicht Entwicklung langlebigerer Batterien, z.B. für Elektromobilität
- Sichtbarmachen von Spannungen in Eisenbahnschienen: Ermöglicht Entwicklung besserer Herstellungsverfahren
- Verbesserung der „Verpackung“ von mRNA-Wirkstoffen: Ergebnisse wurden für Corona-Impfstoffe genutzt



FRM II – Wissenschaft

Neutronenstreuung

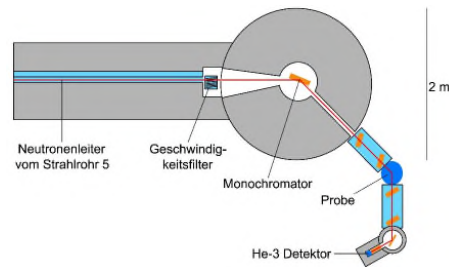
Neutronenspektroskopie

Messung der Energie- und Richtungsverteilung von Neutronen nach inelastischer Streuung an Materie.

Experimente am FRM II:

- PANDA
 - PUMA
 - MIRA
 - KOMPASS
 - TRISP
 - RESEDA
 - J-NSE
 - SPHERES
 - TOF-TOF
 - DNS
- 3-Achsen-Spektroskopie*
- Spin-Echo-Spektroskopie*
- Rückstreu-Spektrometer*
- Flugzeitspektroskopie*

Beispiel TRISP:



62

TRISP ist ein kombiniertes 3-Achsen- und Spin-Echo-Spektrometer

Neutronenspektrometrie liefert Informationen über Bewegungsvorgänge in der Probe



FRM II – Wissenschaft

Neutronenstreuung

Neutronenspektroskopie

Messung der Energie- und Richtungsverteilung von Neutronen nach inelastischer Streuung an Materie.

Beispiele für Forschung am FRM II:

- Supraleitung
- Innere Dynamik von Molekülen
- Diffusion in flüssigen Medien
- Datenspeicher der Zukunft
- Streuung von Phononen



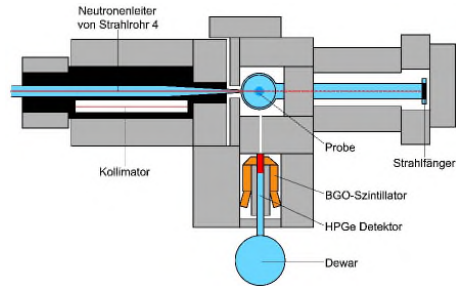
Aktivierungsanalyse

Proben werden durch Neutronen aktiviert und dann das γ -Spektrum der Aktivierungsprodukte analysiert

Experimente am FRM II:

- PGAA
- NAA

Beispiel PGAA:





Aktivierungsanalyse

Proben werden durch Neutronen aktiviert und dann das γ -Spektrum der Aktivierungsprodukte analysiert

Beispiele für Forschung am FRM II:

- Korrosionsschutz bei archäologischen Fundstücken (PGAA)
- Herkunft und Echtheit von archäologischen Objekten anhand ihrer Elementzusammensetzung (PGAA)
- Quantifizierung von Verunreinigungen in Siliziumkristallen (NAA)
- Klassifikation von Meteoriten über ihren Iridiumgehalt (NAA)

- Korrosionsschutz bei archäologischen Fundstücken: Metallische Artefakte überdauern die Jahrhunderte ohne zu rosten im Boden. Nach dem Ausgraben verrosten sie schnell (es liegt an eingelagertem Chlor). Mit Hilfe der PGAA wurde ein Verfahren entwickelt, dieses Chlor durch Erhitzen auf 750 °C auszutreiben und so das Verrosten zu verhindern.
- Verunreinigungen in den Siliziumkristallen: Genauigkeit im ppt/ppq-Bereich, wichtig für Entwicklung besserer Verfahren zur Herstellung von Photovoltaikanlagen



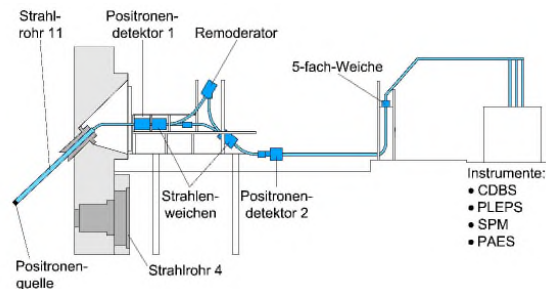
Positronenquelle

NEPOMUC erzeugt durch Neutronenbestrahlung Positronen, die für Spektroskopie oder Imaging genutzt werden

Experimente an NEPOMUC:

- PLEPS
 - PAES
 - CDBS
 - SPM
- } Positronenspektroskopie
} Positronenspektroskopie und -imaging

Es ist stets nur ein Experiment in Betrieb.



Prinzip der Positronenquelle:

- Neutroneneinfang in Kadmium-113 erzeugt hochenergetische γ -Quanten
- diese werden in Platinfolien zu Elektron-Positron-Paaren konvertiert
- die Positronen werden per Magnetfeld zu den Instrumenten transportiert
- Quellstärke bis 10^9 s^{-1}

Die Positronen annihilieren mit Elektronen in der Probe wieder zu γ -Quanten, deren Messung Aussagen über Defekte in Oberflächen ermöglichen.

Der „Remoderator“ ermöglicht eine höhere „Brillanz“ (Beschränkung der Energiebandbreite) durch Absorption und Re-Emission in einem Wolfram-Einkristall. Dies geht aber auf Kosten der Strahlintensität.



Positronenquelle

NEPOMUC erzeugt durch Neutronenbestrahlung Positronen, die für Spektroskopie oder Imaging genutzt werden

Beispiele für Forschung am FRM II:

- Untersuchung von Defekten in Festkörperoberflächen
- Materialentwicklung für Photovoltaik



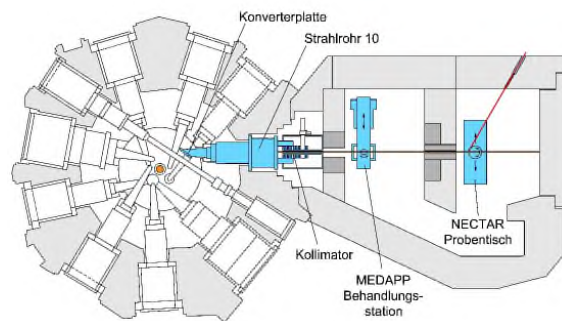
FRM II – Wissenschaft

Medizinische Bestrahlung

Medizinische Bestrahlung Medizinische Bestrahlungseinrichtung zur Tumorthapie.

Hauptzweck ist die Behandlung oberflächennaher Tumore mit Spaltneutronen. Dies hat jedoch seit 2009 stetig abgenommen, da inzwischen andere Methoden bevorzugt werden.

Stattdessen werden die Spaltneutronen jetzt mehr für die Wissenschaft genutzt.



68

Kooperation mit Uni-Klinikum Rechts der Isar

Zwischen 2007 und 2015 wurden 126 Patienten behandelt.
Wirksame Bestrahlungstiefe bis ca. 5 cm unter der Haut.

Alternativverfahren:

- Schwerionenbestrahlung mit C-12
- Brachytherapie (Einbringen von Strahlungsquellen in den Tumor)

PAUSE











Einführung für Besucherführer

FRM II – Entsorgung abgebrannter Brennelemente



FRM II – Entsorgung abgebrannter Brennelemente

Lebenslauf eines Brennelements

-  Fertigung des Brennelements bei Framatome in Frankreich
-  Transport in Chargen von 4 Stück zum FRM II
-  Einsatz im Reaktor für einen Zyklus von 60 Tagen pro Brennelement
-  Aufbewahrung im Absetzbecken für min. 6,5 Jahre (Abklingen kurzlebiger Aktivitäten)
-  Einbringung von je 5 Brennelementen in Behälter CASTOR® MTR3
-  Transport zum Zwischenlager Ahaus (NRW)
-  Zwischenlagerung dort bis zur Verfügbarkeit eines Endlagers
-  Einlagerung im Endlager, sobald der Bund eines gebaut hat

Aktuell werden nur die Schritte 1-4 durchgeführt. Die Schritte 5-7 (Beladung, Transport und Einlagerung von CASTOR-Behältern) waren ab 2021 geplant, haben sich aber wegen notwendiger Maßnahmen im ZWL Ahaus verzögert.

Die Schaffung eines Endlagers ist nach §9a, Abs 3 AtG alleinige Aufgabe des Bundes. Der FRM II hat hierbei keine Einflussmöglichkeit.

Endlager für schwachaktive (Putzlappen, Schutzkleidung,...) und mittelaktive (Filterharze, Reaktoreinbauten, ...) Abfälle wird 2027 eröffnet: Schacht Konrad (Salzgitter, NI).

Weitere deutsche Endlager:

- Morsleben (Börde, ST): Endlager der DDR für schwach- und mittelaktiven Abfall. Genutzt 1971-98, aber inzwischen geschlossen. Antrag zur Verfüllung ist eingereicht.
- Asse (Wolfenbüttel, NI): Versuchsendlager für schwach- und mittelaktiven Abfall. Genutzt 1967-78, danach 1995-2004 verfüllt. Nach Salzlakeeintrag und Zweifeln an der Geologischen Stabilität wurde 2017 die Bergung der eingelagerten Fässer beschlossen (Abschluss geplant 2033).



FRM II – Entsorgung abgebrannter Brennelemente

Vergleich CASTOR-Behälter



CASTOR® V/19 für Brennelemente von Druckwasserreaktoren

Höhe: 594 cm
Durchmesser: 244 cm
Leermasse: 108 t
Beladung: 19 BE

CASTOR® MTR3 für Brennelemente von Forschungsreaktoren

Höhe: 160 cm
Durchmesser: 150 cm
Leermasse: 16 t
Beladung: 5 BE



Abbildungen im gleichen Maßstab!

Besonderheiten CASTOR MTR3:

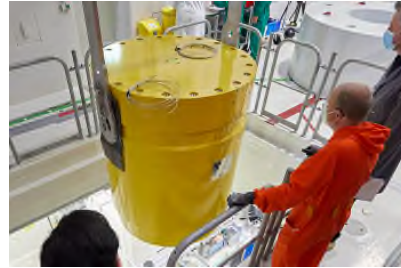
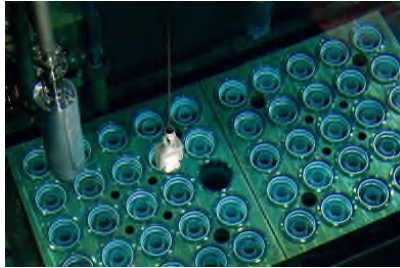
- Nutzung durch Forschungsreaktoren Berlin (BER II), Garching (FRM II) und Mainz (FRMZ)
- FRM II-Brennelemente müssen vor Beladung um einige cm gekürzt werden
- Größe des MTR3 ist beschränkt durch Straßentransportfähigkeit in stehendem Zustand
- Gesamtgewicht mit Stoßdämpfern 24 t
- Dosisleistung in 2 m Abstand im beladenen Zustand: erlaubt 100 $\mu\text{Sv/h}$, tatsächlich 7 $\mu\text{Sv/h}$
(entspricht der Dosisleistung durch Höhenstrahlung bei einem Transatlantikflug)

Masse CASTOR V/19 beladen: 124 t



FRM II – Entsorgung abgebrannter Brennelemente

Bilder





FRM II – Abschluss

Fragen

Noch Fragen?

- Was wurde vergessen anzusprechen?
- Benötigen Sie noch mehr Informationen?
- Können wir Ihnen sonst irgendwie helfen?



Danke für Ihr Interesse!

Und viel Erfolg bei der nächsten Führung...