



# Wissenschaftliche Experimente

## FRM II

von  
Dipl.-Phys. Carsten Fister

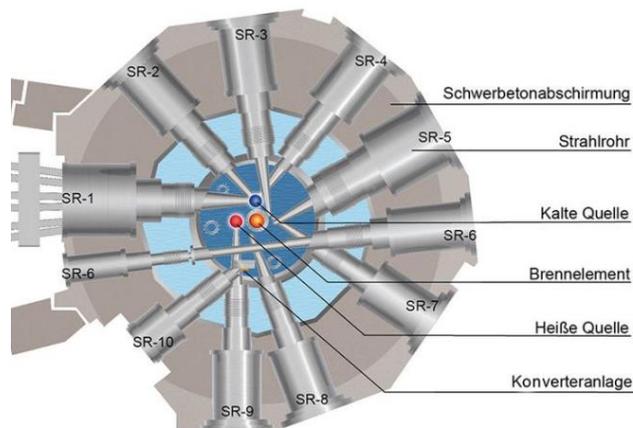
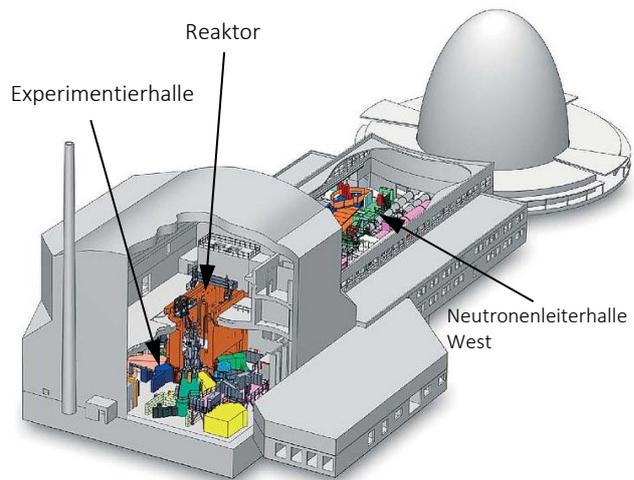
## 1 Übersicht

Als Forschungsreaktor stellt der FRM II Neutronen in einem breiten Energiespektrum für wissenschaftliche Experimente zur Verfügung. Ungefähr 30 Instrumente sind in der **Experimentierhalle** (also rund um den Reaktor im Reaktorgebäude) und in der **Neutronenleiterhalle West** aufgebaut. Weitere Instrumente sollen künftig auch in der **Neutronenleiterhalle Ost** entstehen.

Die Ausleitung der Neutronen aus dem Reaktor zu den Messaufbauten geschieht über insgesamt zwölf **Strahlrohre**.

Die Einbaulage der waagerechten Strahlrohre 1 bis 10 wird im Bild unten gezeigt. Die Strahlrohre 11 und 12 ragen schräg von oben in den Moderatortank und sind nicht abgebildet.

Um das Spektrum der wissenschaftlich nutzbaren Neutronen zu vergrößern, verfügt der FRM II über mehrere **sekundäre Neutronenquellen**, die durch geeignete physikalische Effekte die „thermischen“ Neutronen des Reaktors abbremsen oder beschleunigen, bzw. daraus erneut Spaltneutronen erzeugen.<sup>1</sup>



Folgende Neutronenenergien können so vom FRM II abgedeckt werden<sup>2</sup>:

<b>Kalte Neutronen:</b>	ca. 2 meV
<b>Thermische Neutronen:</b>	ca. 25 meV
<b>Heiße Neutronen:</b>	ca. 100 meV
<b>Spaltneutronen:</b>	ca. 1,9 MeV

## 2 Neutronenleiter

Da der Platz direkt am Reaktor begrenzt ist, werden die Neutronen teilweise hinter den Strahlrohren mit **Neutronenleitern** zu den - bis zu 70 Meter entfernten - Experimenten geleitet. Dabei handelt es sich um rechteckige Glaskanäle, die innen mit einer Nickel-Titan-Sandwichbeschichtung „verspiegelt“ sind<sup>3</sup>. Außen sind sie mit Blei und Polyethylen umgeben, um Gamma- und Neutronenstrahlung abzusichern.

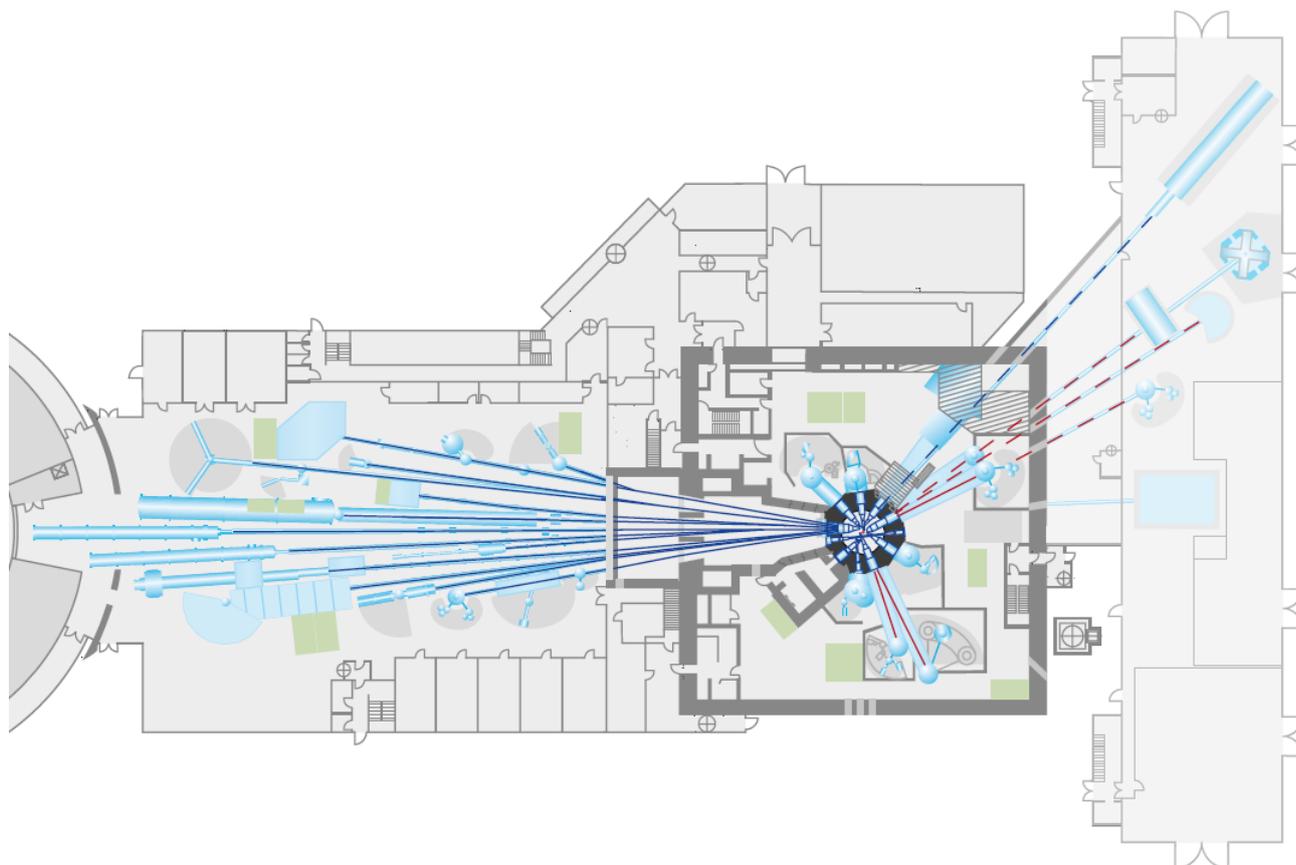
Durch eine geeignete Form der Neutronenleiter können die Neutronenstrahlen außerdem - je nach Bedarf des Experimentes - fokussiert, defokussiert, gefiltert und aufgeteilt werden. Letzteres ermöglicht es auch, mit nur einem Neutronenleiter mehrere Messaufbauten zu versorgen.

Da die Neutronenleitung mit energiearmen („kalten“) Neutronen am besten funktioniert, sind die Experimente mit diesen überwiegend in der Neutronenleiterhalle, und somit weiter entfernt vom Reaktor, aufgebaut. Alle Experimente mit höherenergetischen Neutronen befinden sich dagegen in der Experimentierhalle unmittelbar am Reaktor.

<sup>1</sup> Weitere Informationen zum Aufbau des Reaktors und zu den sekundären Neutronenquellen sind der Schulungsunterlage „Übersicht über die Gesamtanlage“ zu entnehmen.

<sup>2</sup> Geschwindigkeiten zum Vergleich: Kaltes Neutron = Concorde, Thermisches Neutron = Geostationärer Satellit, Heißes Neutron = Apollo-Kapsel beim Wiedereintritt, Spaltneutron = 1/15 der Lichtgeschwindigkeit

<sup>3</sup> Mehrere abwechselnde Schichten aus Nickel und Titan. Für Totalreflexion muss der Auftreffwinkel  $<0,1^\circ$  sein.



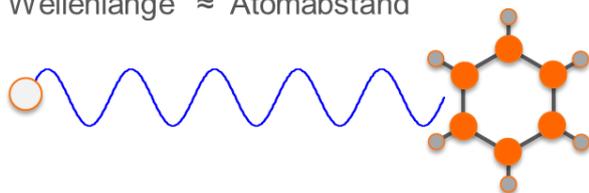
Das obenstehende Bild zeigt die existierenden (durchgezogen) und geplanten (gestrichelt) Neutronenleiter am FRM II.

### 3 Messverfahren und Experimente

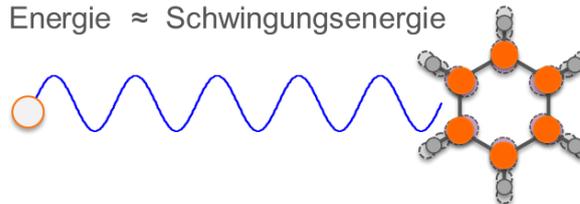
Forschung mit Neutronen wird vor allem betrieben, um die Struktur und innere Dynamik der Materie zu untersuchen. Dabei haben Neutronen gegenüber anderen Messverfahren (z.B. mit Röntgenstrahlung) zwei entscheidende Vorteile:

- Neutronen haben zwar einen Spin (und wechselwirken daher mit Magnetfeldern), aber keine elektrische Ladung. Daher sind sie ideal zur Untersuchung magnetischer Strukturen oder Dynamiken.
- Wellenlänge und Energie von kalten und thermischen Neutronen entsprechen denen der typischen Untersuchungsobjekte. Daher können Veränderungen dieser Größen in den Proben mit besonders hoher Genauigkeit gemessen werden.

Wellenlänge  $\approx$  Atomabstand



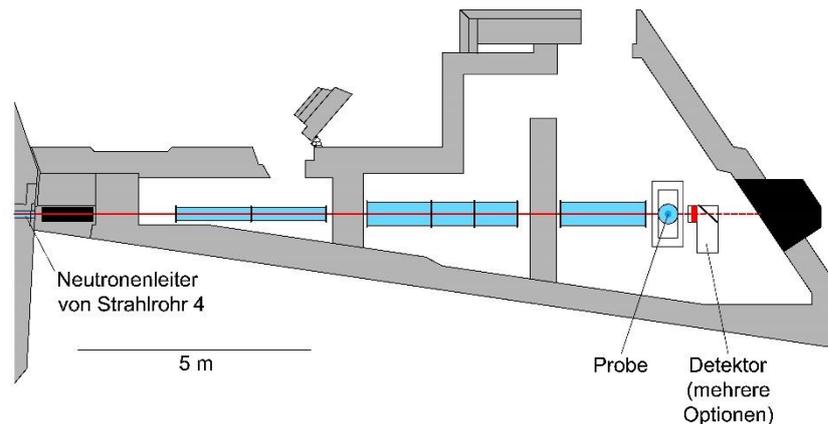
Energie  $\approx$  Schwingungsenergie



### 3.1 Bildgebende Verfahren

Bei der Neutronenbildgebung („Imaging“) wird zerstörungsfrei das Innere von Proben sichtbar gemacht. Die Funktionsweise ist nahezu identisch zu Röntgenuntersuchungen in der Medizin. Dabei wird ausgenutzt, dass die Interaktion von Neutronen mit Materie stark vom untersuchten Material abhängt. Wasserstoff kann beispielsweise auch durch mehrere Zentimeter Metall hindurch erkannt werden.

Am FRM II basieren **ANTARES** und **NECTAR** auf diesem Prinzip. Hier wird die räumliche Verteilung von Wasserstoff (enthalten in Wasser, Ölen, Klebstoffen, etc.) in komplexen Objekten untersucht, was beispielsweise für Fahrzeugtechnik, Biologie oder Archäologie von Bedeutung ist.



Kalte Neutronen-Radiographie- und Tomographie-Station ANTARES

### 3.2 Neutronenstreuung

Der am häufigsten genutzte physikalische Effekt bei den Experimenten am FRM II ist die **Neutronenstreuung** („Scattering“). Dabei wird ausgenutzt, dass Flugrichtung und/oder Energie eines Neutrons sich beim Durchgang durch Materie verändern können, abhängig von der Energie des Neutrons und von den Eigenschaften der durchdrungenen Materie. So können detaillierte Aussagen über Struktur und Dynamik der Materie auf atomarer Ebene getroffen werden.

Im Zusammenhang mit der Neutronenstreuung werden vor allem zwei Messverfahren verwendet:

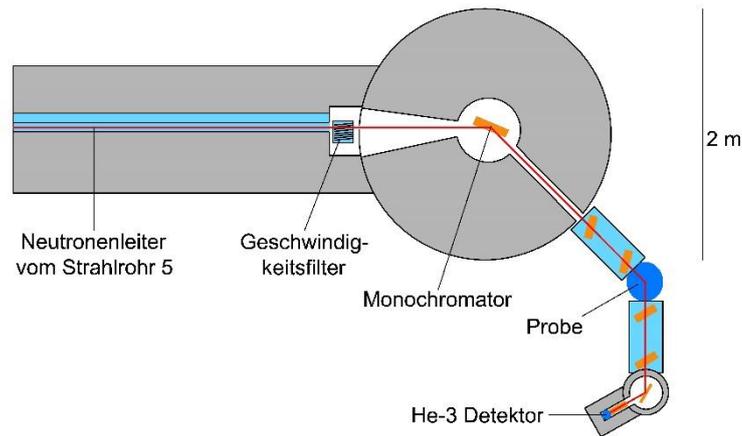
- **Neutronenspektroskopie:**

Die Neutronen streuen inelastisch an Materie, d.h. sie wechselwirken mit der Materie - vor allem mit den Atomkernen der Probe - und nehmen Energie auf oder geben sie ab. Durch Messung des Streuwinkels in Verbindung mit der Energie der gestreuten Neutronen, können Aussagen über innere Dynamiken getroffen werden.

Viele Experimente am FRM II arbeiten nach diesem Prinzip. Sie lassen sich drei Messmethoden zuordnen: 3-Achsen-Spektroskopie (**PANDA, PUMA, MIRA, KOMPASS, TRISP<sup>4</sup>**), Spin-Echo-Spektroskopie (**TRISP, RESEDA, J-NSE**) und Flugzeitspektroskopie (**TOFTOF, DNS, REFSANS**).

Die Energie-Auflösung eines Experiments muss an die Zeitskala der beobachteten Dynamiken angepasst sein. Um die volle Bandbreite an Bewegungsgeschwindigkeiten abdecken zu können, benötigt man daher in der Neutronenspektroskopie eine vergleichsweise hohe Zahl an Experimenten: Mit einer hohen Energie-Auflösung können sehr langsame Bewegungen untersucht werden (z.B. Diffusion in Glas). Für schnelle Bewegungen (z.B. Gitterschwingungen) benötigt man dagegen eine geringe Energie-Auflösung.

<sup>4</sup> TRISP kombiniert die Methoden der 3-Achsen-Spektroskopie und der Spin-Echo-Spektroskopie.

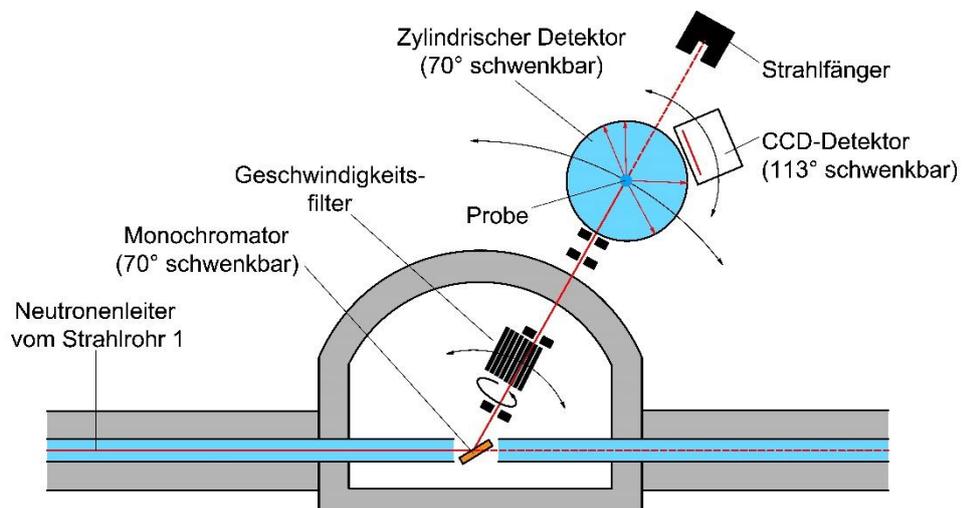


3-Achsen-Spin-Echo-Spektrometer TRISP

- **Neutronendiffraktometrie:**

Die Neutronen streuen elastisch an Materie, d.h. es wird keine Energie zwischen Neutronen und Materie übertragen (Beugung). Die Kugelwellen der einzelnen Streuungen erzeugen ein messbares Interferenzmuster.

Experimente nach diesem Prinzip sind **SPODI**, **STRESS-SPEC**, **RESI**, **HEiDi** und **POLI** („klassische“ Diffraktometer), **MARIA**, **NREX** und **REFSANS** (Reflektometer für hohe Tiefenauflösung) sowie **SANS-1** und **KWS-1/-2/-3** (Kleinwinkeldiffraktometer für besonders große Strukturen). Diese Methode wird am FRM II zur Untersuchung von Ladevorgängen in Energiespeichern und zur Strukturuntersuchung von Materialien (Kristalle, Metalle) eingesetzt. Dazu kommt **BIODIFF** zur Untersuchung von Proteinstrukturen (z.B. im Zusammenhang mit Antibiotikaresistenz).

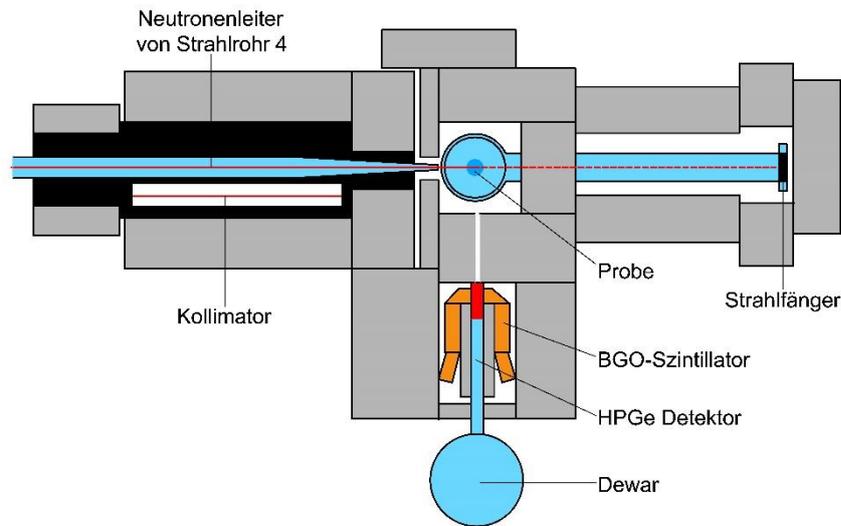


Diffraktometer BIODIFF für die Untersuchung biologischer Makromoleküle

### 3.3 Aktivierungsanalyse

Bei der Aktivierungsanalyse werden Proben durch Neutronenbestrahlung aktiviert und das entstehende charakteristische Zerfallsspektrum gemessen (z.B.  $\gamma$ -Spektrum). Dadurch können sehr detaillierte Aussagen über die Elementzusammensetzung der Probe gemacht werden.

Experimente wie **PGAA** und **NAA** nutzen dieses Messverfahren am FRM II, beispielsweise zur Analyse der Zusammensetzung von kunsthistorischen oder biologischen Proben oder im Bereich der Materialwissenschaften.



Prompte Gamma-Aktivierungsanalyse PGAA

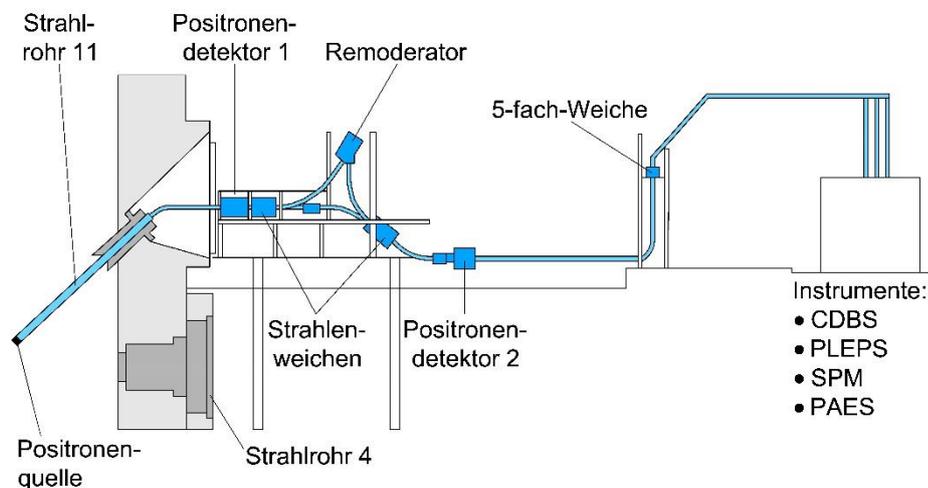
### 3.4 Positronenquelle

Die Positronenquelle **NEPOMUC** ist kein Messverfahren, sondern eine Einrichtung, die im Neutronenfeld des Reaktors Positronen erzeugt und diese verschiedenen nachgeordneten Experimenten zur Verfügung stellt. Außer in der Grundlagenforschung werden Positronen auch in der angewandten Physik eingesetzt, um kleinste Materialfehler aufzuspüren.

An NEPOMUC sind folgende Experimente angeschlossen:

- PAES (Auger-Elektronenspektrometer)
- PLEPS (Spektrometer für gepulste niederenergetische Positronen)
- CDBS (Doppler-Verbreiterungsspektrometer)
- SPM (Rasterpositronenmikroskop)

Die vier genannten Instrumente dienen vor allem der Spektroskopie an Materialoberflächen, die bei den letztgenannten Apparaturen ermöglichen zusätzlich auch (Raster-)Imaging.

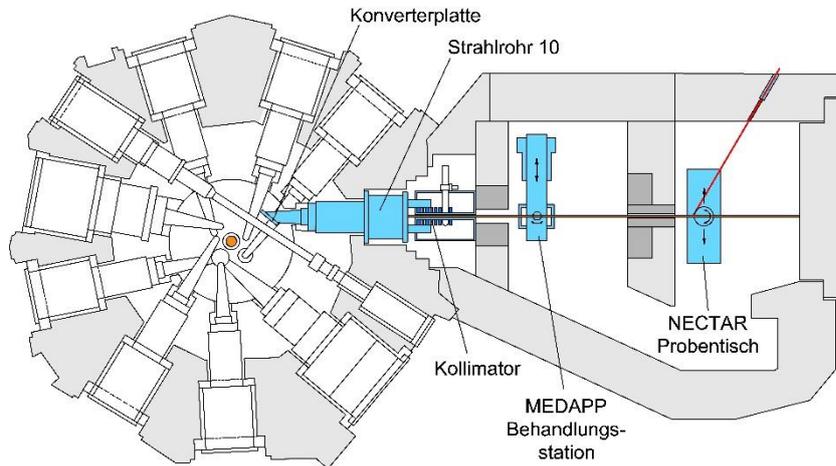


Positronenquelle NEPOMUC

### 3.5 MEDAPP

**MEDAPP** ist eine medizinische Bestrahlungseinrichtung zur Tumorthherapie (überwiegend palliativ, für oberflächennahe Tumore auch kurativ). Dabei nutzt man die wesentlich höhere biologische Wirksamkeit und geringere Eindringtiefe von Neutronenstrahlung im Vergleich zur sonst üblichen Röntgenstrahlung.

Aktuell wird die Anlage in Kooperation mit dem Klinikum rechts der Isar umgebaut.



Medizinische Behandlungseinrichtung MEDAPP sowie Radiographie und Tomographie mit Spaltneutronen NECTAR

Im Rahmen des technischen und medizinischen Fortschritts werden heute zunehmend andere Verfahren für die Tumorthherapie verwendet (Schwerionenbestrahlung, Brachytherapie) und die Zahl der Tumorbehandlungen am FRM II hat seit 2009 deutlich abgenommen. Stattdessen wird nun auch MEDAPP zunehmend für wissenschaftliche Untersuchungen genutzt.

Die medizinischen Aktivitäten am FRM II konzentrieren sich aktuell vor allem auf die Erzeugung von Radioisotopen. Darunter sind Ho-166 (Therapie von Lebertumoren), Lu-177 (Therapie von Darm- und Prostatumoren), sowie künftig Mo-99 (Radioisotopendiagnostik).<sup>5</sup>

### 3.6 Exemplarische Forschungsthemen

Die folgenden Veröffentlichungen sind Beispiele für konkrete Forschungsthemen, die in den letzten Jahren mit den Experimenten am FRM II bearbeitet wurden:

- Kondenswasser in Flugzeugisolierungen (ANTARES, 2010)
- Entwicklung der Antibiotika-Resistenz in Bakterien (BIODIFF, 2013)
- Be- und Entladen von Metallhydriden als Wasserstoffspeicher (NECTAR, 2015)
- Effektivität der CO<sub>2</sub>-Rückhaltung in porösem Gestein (KWS-3, 2016)
- Faulprozesse in Membranfiltern zur Trinkwasseraufbereitung (KWS-3, 2016)
- Korrosionsschutz für archäologische Fundstücke durch Erhitzen (PGAA, 2016)
- Struktur von Eiswolken (SPODI, 2016)
- Alterungsvorgänge in Akkus (SPODI, 2017)
- Entwicklung einer Biotinte für den 3D-Druck von medizinischem Gewebe (KWS-1, 2017)

<sup>5</sup> Weitere Informationen zu den für die Erzeugung von Radioisotopen genutzten Bestrahlungssystemen sind der Schulungsunterlage „Übersicht über die Gesamtanlage“ zu entnehmen.

- Hochtemperaturfeste Legierungen für künftige Gasturbinen (STRESS-SPEC, 2017)
- Befüllen von Akkus mit Elektrolytflüssigkeit (ANTARES, 2018)
- Neuartige platinfreie Membranen für Brennstoffzellen (KWS-2, 2018)
- Struktur von Damaszenerstahl in historischen Schwertern (ANTARES, 2018)
- Verbesserung organischer Solarzellen durch Zusatzstoffe (REFSANS, 2018)
- Entwicklung der Embryonen in Dinosauriereiern (NECTAR, 2019)
- Prüfverfahren für neuartige Sägeblätter (STRESS-SPEC, 2019)
- Umweltfreundliches Verpackungsmaterial aus Zellulose-Nanofasern (SANS-1, 2019)
- Ablauf der Gefriertrocknung bei Lebensmitteln (ANTARES, 2020)
- Optimierte Transportmoleküle für mRNA-Medikamente (KWS-2, 2021)