

**Neutronen sind Licht:**  
**Die „Forschungs-Neutronenquelle**  
**Heinz Maier-Leibnitz“ (FRM-II)**  
**in Garching\***

Prof. Dr. Dr. h.c. mult. Wolfgang A. Herrmann  
Präsident der Technischen Universität München

**Plenarvortrag**  
**Jahrestagung Kerntechnik 2004**  
**Deutsches Atomforum e.V.**  
**Düsseldorf, 25. Mai 2004**

**Gliederung:**

1	Das Konzept der Garchinger Neutronenquelle.....	3
2	Die lange politische und juristische Vorgeschichte.....	11
3	Die dritte Teilgenehmigung und Inbetriebsetzung .....	15
4	Zukünftige Nutzung des FRM-II.....	20
5	Dank und Schluss .....	26

---

\* Auf Beschluss des Verwaltungsrats der TU München vom 26.11.2003 wurde die nunmehr fertiggestellte Neutronenquelle in Garching nach Prof. Heinz Maier-Leibnitz benannt, den großen Pionier der Neutronenforschung, Begründer des Atom-Ei (FRM-I), Professor für Technische Physik an der TUM und langjährigen Präsidenten der Deutschen Forschungsgemeinschaft.

Dieser Vortrag ist den vielen exzellenten Mitarbeitern gewidmet, die über Jahre hinweg ihre Kraft in den Dienst der Wissenschaft von morgen gestellt haben und sich nicht entmutigen ließen. Wir haben zusammengehalten, wir haben durchgehalten, und wir haben deshalb gewonnen: Die „Forschungs-Neutronenquelle Heinz Maier-Leibnitz“ (FRM-II) der Technischen Universität München hat am 2. März 2004 die ersten Neutronen geliefert und nimmt nun ihre Arbeit auf! Der bayerische Ministerpräsident wird die Neutronenquelle in Gegenwart zahlreicher hochrangiger Repräsentanten aus Politik, Wirtschaft und Wissenschaft am 9. Juni 2004 offiziell ihrer Bestimmung übergeben.

Der FRM-II ist der Nachfolger des weithin bekannten Garchinger Atom-Ei von 1959, der ersten kerntechnischen Anlage Deutschlands. Bild 1 zeigt den FRM-II links neben dem legendären Atom-Ei. Der FRM-II wurde als hocheffiziente Neutronenquelle entwickelt, die in erster Linie auf die Durchführung von Strahlrohrexperimenten ausgelegt ist, die aber auch hervorragende Möglichkeiten für die Bestrahlung von Proben und weitere, z.B. medizinische Anwendungen bieten wird. Wegen seines weiter



Bild 1

entwickelten Kernkonzepts und wegen der in den letzten Jahrzehnten erreichten Fortschritte in der Optimierung der kernnahen Nutzereinrichtungen sowie infolge seines besonders breit konzipierten Anwendungsspektrums wird der FRM-II zu den leistungsfähigsten Anlagen der Welt gehören.

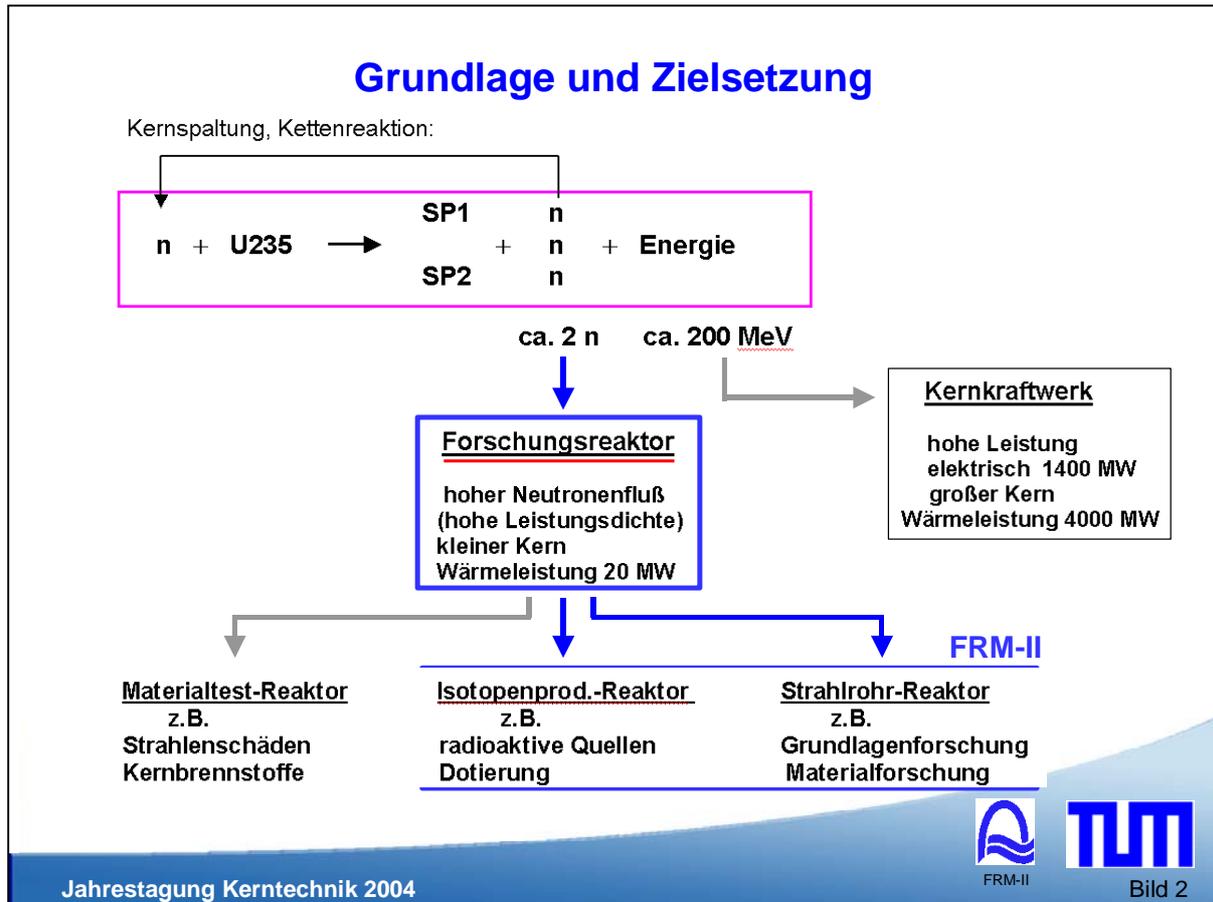
Ich möchte das Konzept des FRM-II als Forschungsreaktor erläutern. Anschließend soll ein Rückblick auf das hinter uns liegende lange Genehmigungsverfahren zeigen, mit welchen Unwägbarkeiten und Hürden der Weg zum erfolgreichen Betrieb gepflastert war. Danach gehe ich im Detail auf die Inbetriebsetzung ein und zeige die wichtigsten Nutzungsmöglichkeiten des FRM-II auf.

Viele Informationen und Fotos finden sich auch im Internet unter [www.frm2.tum.de](http://www.frm2.tum.de). Denn wenn wir über die Wissenschaft hinaus etwas gelernt haben, dann ist es die Kommunikation mit der Öffentlichkeit. Der FRM-II wurde als wissenschaftlich-technisches Großprojekt auch Teil der Politik.

## **1 Das Konzept der Garchingener Neutronenquelle**

Sowohl Forschungsreaktoren als auch Leistungsreaktoren (Kernkraftwerke) beruhen auf dem Prinzip von Kernspaltung und Kettenreaktion (Bild 2). Bei einer typischen Kernspaltungsreaktion wird ein (vorzugsweise „thermisches“, d.h. langsames) Neutron von einem Atomkern des spaltbaren Uranisotops U-235 absorbiert, und es entstehen im wesentlichen zwei Spaltprodukte und im Mittel knapp drei („schnelle“, d.h. hochenergetische) neue Neutronen sowie Energie. Da eines dieser ca. 3 Spaltneutronen für die Aufrechterhaltung der Kettenreaktion benötigt wird, bleiben noch ca. 2 Neutronen verfügbar.

Bei einem Kernkraftwerk ist man vor allem an der Energiefreisetzung (ca. 200 MeV) der Spaltungsreaktion interessiert, für einen Forschungsreaktor dagegen ist die Energiefreisetzung bei der Spaltungsreaktion in aller Regel nur lästig, denn er ist ausschließlich an den 1,5 „übrig bleibenden“ Neutronen interessiert. Für eine solche „Neutronenquelle“ kommt es nicht auf eine hohe Gesamtleistung, also nicht auf eine hohe Zahl der pro Sekunde insgesamt erzeugten Neutronen an, sondern auf eine



möglichst hohe „Dichte“ bzw. einen möglichst hohen „Fluss“ der verfügbaren Neutronen, denn diese sollen letztlich in den zu untersuchenden Proben mit hoher Intensität messbare Wechselwirkungen hervorrufen. Ein Forschungsreaktor hat aus wirtschaftlichen und anderen Gründen nur eine relativ geringe thermische Leistung (beim FRM-II sind das 20 MW, also etwa 1/200 der thermischen Leistung eines Kernkraftwerks), aber einen sehr kleinen Reaktorkern mit einer Leistungsdichte, die weit oberhalb derjenigen von Kernkraftwerken liegen kann.

Die so definierten Forschungsreaktoren lassen sich im wesentlichen in drei verschiedene Nutzungsbereiche untergliedern, die sich allerdings bei sehr vielen Anlagen überlappen. Der „Materialtestreaktor“ ist im ursprünglichen Sinne für die Untersuchung von Kernbrennstoffen und von Strahlenschäden in Strukturmaterialien durch in der Regel schnelle Neutronen ausgelegt; diese Anwendungen sind beim FRM-II nicht vorgesehen. Der „Isotopenproduktionsreaktor“ dient der Erzeugung von radioaktiven Isotopen und Quellen und prinzipiell auch der Dotierung mit stabilen Elementen. Im

Zentrum der Entwicklung aber standen in letzter Zeit die „Strahlrohrreaktoren“, bei denen in der Regel langsame Neutronen über Strahlrohre in eine Experimentierhalle gelangen, um dort z.B. an zu untersuchenden Proben gestreut zu werden. Der darauf spezialisierte 58 MW Hochflussreaktor RHF des internationalen Instituts ILL in Grenoble stellt die weltbeste Anlage dieser Art dar.

Der neue FRM-II wird als Mehrzweckreaktor in weitem Umfang hochqualitative Nutzungen aus den beiden letztgenannten Bereichen ermöglichen. Die einzigartigen Leistungsmerkmale des FRM-II – wie hoher maximaler thermischer Neutronenfluss, hohe spektrale Reinheit der Energieverteilung der Neutronen und großes nutzbares Volumen außerhalb des Kerns – werden durch den Einsatz eines mit Leichtwasser gekühlten Reaktorkerns erreicht, der sich im Zentrum eines mit Schwerwasser gefüllten Moderator tanks befindet (siehe Bild 3). Um diese hervorragenden Eigenschaften schon bei der relativ geringen Reaktorleistung von 20 MW – sozusagen ein Limit für eine an einer Hochschule angesiedelte Anlage in der Bundesrepublik Deutschland – erreichen zu können, wurde der Reaktorkern als besonders kleinvolumiger „Kompaktkern“ konzipiert. Das ist die wirklich originelle Konzeptneuheit. Dieser Kern be-

### Konzeptmerkmale

- Forschungsreaktor, optimiert zur Erzeugung von Neutronenstrahlen für Grundlagenforschung und Anwendungen
- Auslegung/Errichtung: Siemens/Framatome FANP und TUM
- Eigenschaften des Forschungsreaktors:
  - 20 MW thermische Leistung
  - Zylindrischer Kompaktkern, 8 kg Uran (93% angereichert),  $U_3Si_2$ -Al
  - 52 d Zykluszeit pro Brennelement, bis zu 5 Zyklen pro Jahr
  - $H_2O$  Brennelement-Kühlung,  $D_2O$  Moderator/Reflektor
  - Berechneter ungestörter thermischer Neutronenfluss:  
max.  $8 \times 10^{14}$  n/cm<sup>2</sup>s

steht aus einem einzigen zylinderförmigen Brennelement, in dem eine Kombination des hochdichten Uransilizid-Aluminium-Dispersionsbrennstoffs mit hochangereicherem Uran (HEU, mit rund 93 % U-235) Anwendung findet. Der ungefähr 8 kg Uran enthaltende Brennstoff wird in insgesamt 113 Brennstoffplatten eingebracht, die zwischen ein inneres und ein äußeres Brennelementrohr eingeschweißt werden, das etwa 130 cm hoch ist. Da der Reaktorkern sehr kompakt und die Leckage der schnellen Spaltneutronen in den umgebenden Moderatortank deshalb sehr hoch ist (netto etwa 50 %), tragen die aus dem Schwerwasser (D<sub>2</sub>O) des Moderatortanks in den Kern zurück diffundierenden thermalisierten Neutronen ganz erheblich zur Aufrechterhaltung der Kettenreaktion bei. Auf diese Weise wird ein maximaler thermischer Neutronenfluss von etwa  $8 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  erreicht („ungestörter“ Wert, d.h. ohne Berücksichtigung der experimentellen Einbauten im Moderatortank). Durch sein auf der Grundlage des RHF (Grenoble) und des HFIR (Oak Ridge, USA) weiterentwickeltes „Kompaktkern-Konzept“ besitzt der FRM-II das mit Abstand beste Verhältnis von Neutronenfluss zu Reaktorleistung weltweit.

Bild 4 zeigt einen schematischen Vertikalschnitt durch das Reaktorbecken. Dieses ist 14 m tief und hat unten einen annähernd kreisförmigen Querschnitt von ca. 5 m Durchmesser. An das Reaktorbecken schließt oben links das rechteckige, etwa 8 m tiefe Absetzbecken an, in dem sich u. a. Lagergestelle für die vorübergehende Aufbewahrung abgebrannter Brennelemente befinden. Beide Becken bestehen aus einer massiven Betonstruktur mit einer auf der Innenseite angebrachten wasserdichten Edelstahlauskleidung. Im Mittelpunkt von Bild 4 ist der D<sub>2</sub>O-Moderatortank mit dem im Zentralkanal aufgehängten Brennelement zu erkennen. Man sieht auch den zentralen Regelstab, der von dem oben befindlichen Antrieb gesteuert wird. Er ist mit dem Antriebsgestänge über eine elektromagnetische Kupplung verbunden, die im Anforderungsfall stromlos gemacht wird, so dass dann der Regelstab nach unten in die Abschaltposition fällt. Somit wirkt der Regelstab auch als eines der beiden redundanten und diversitären schnellen Abschaltssysteme. Das andere schnelle Abschaltssystem wird durch fünf Abschaltstäbe im Moderatortank gebildet, die während des Reaktorbetriebs voll ausgefahren sind. Ebenfalls in Bild 4 angedeutet sind die Strahlrohre und die Kalte Quelle.

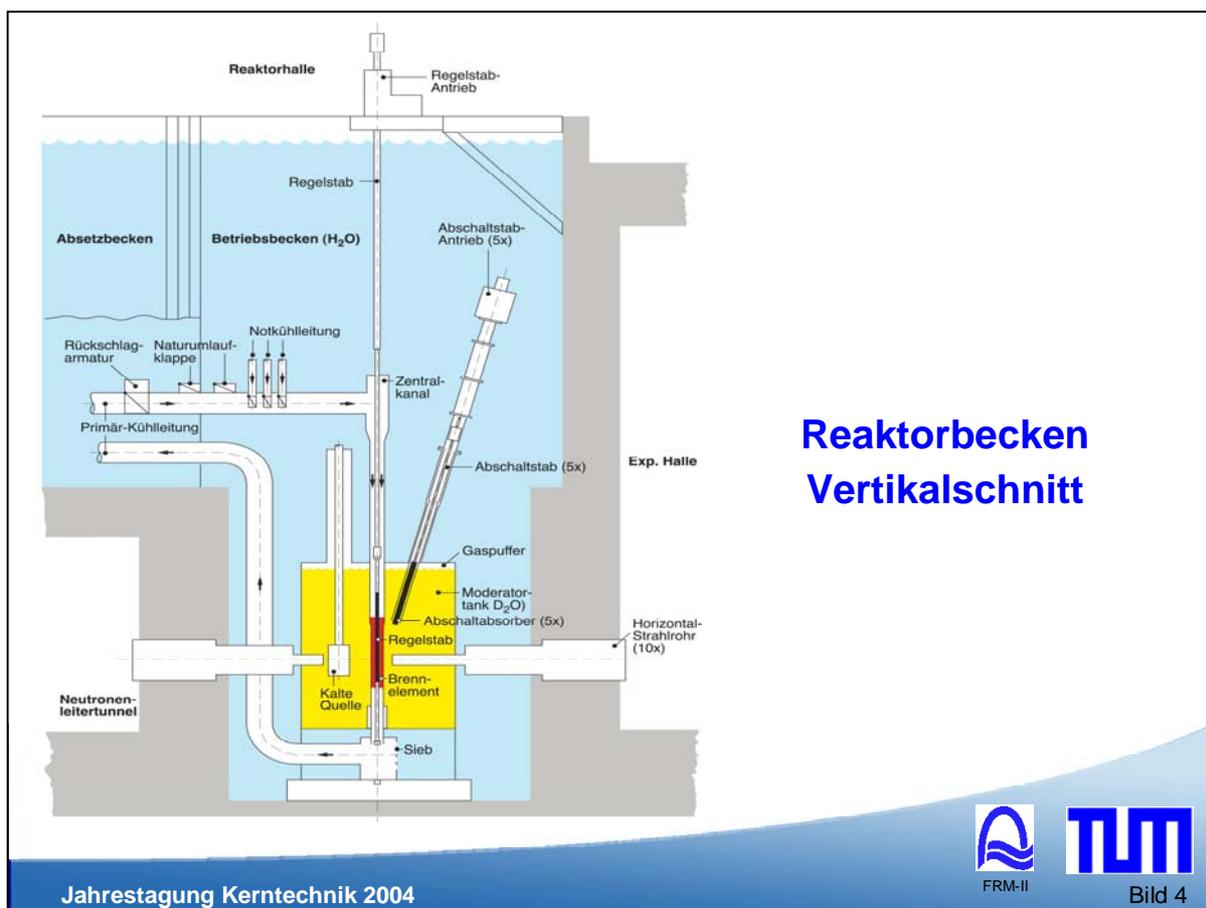
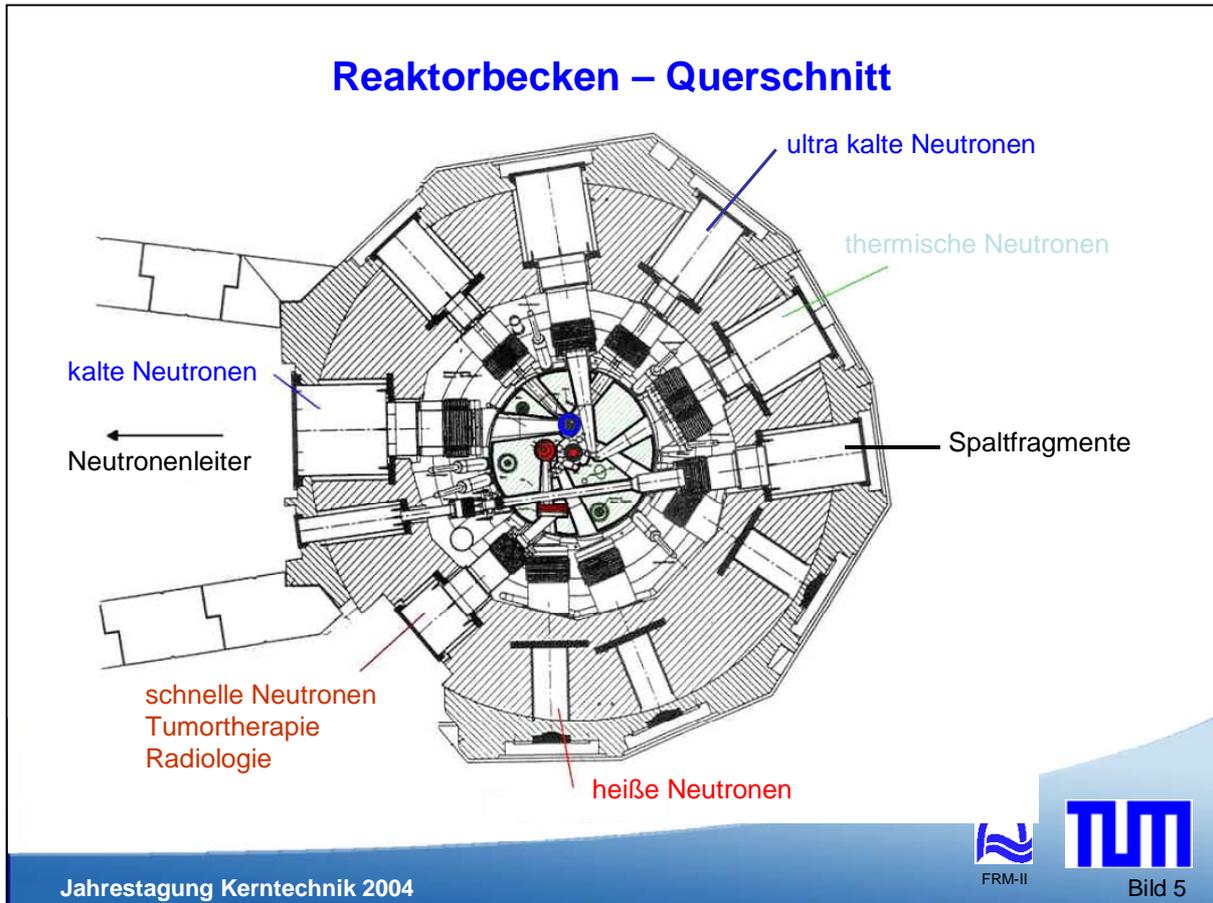
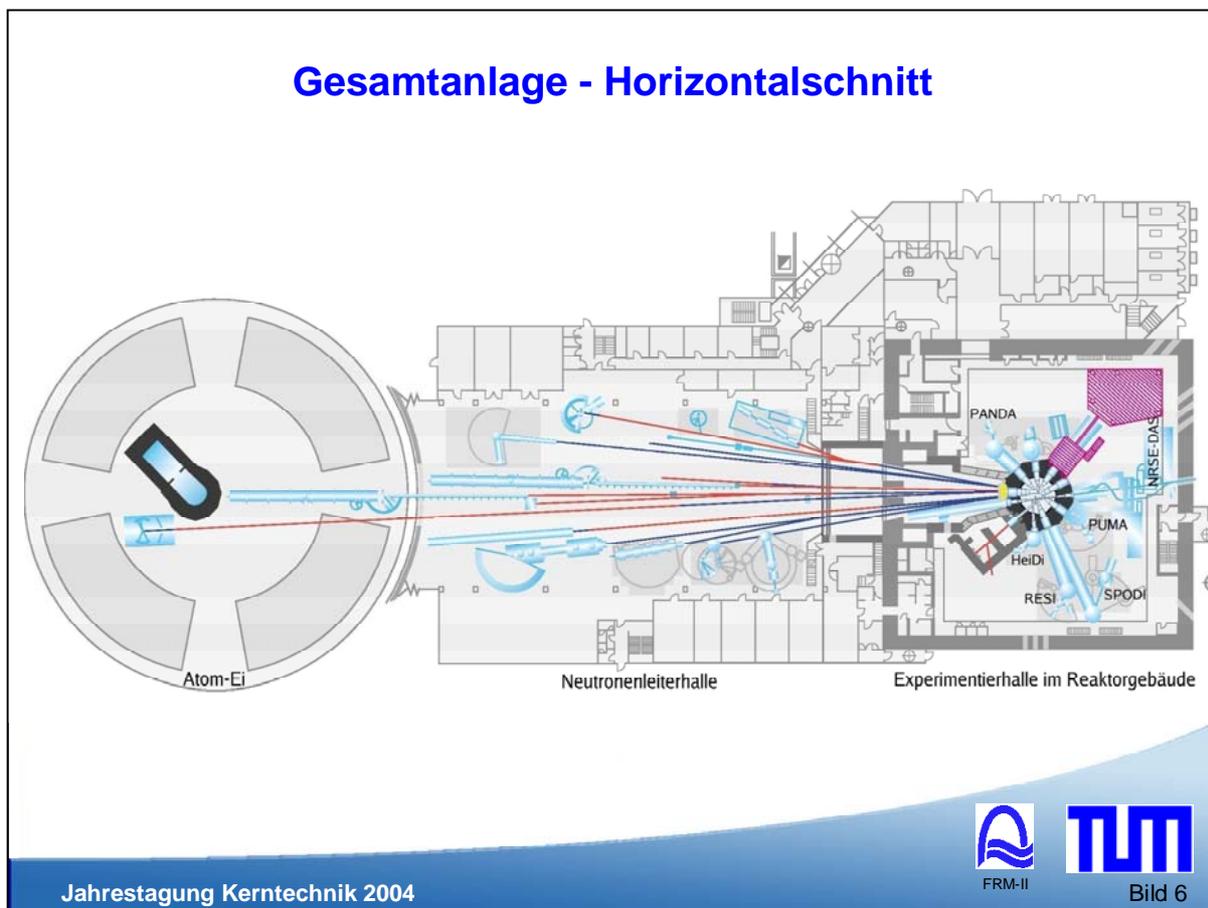


Bild 5 zeigt einen horizontalen Schnitt durch das Reaktorbecken in Höhe des Kerns. Im Zentrum ist der Schwerwassertank (Durchmesser 2,5 m) mit dem Brennelement zu erkennen. Zehn große horizontale Strahlrohre führen die Neutronen durch die Wand des Reaktorbeckens in die Experimentierhalle im Reaktorgebäude oder in einem Fall (im Bild links) über einen sich anschließenden Tunnel in die benachbarte Neutronenleiterhalle. Alle Strahlrohre sind tangential zum Kern ausgerichtet, also ohne direkte „Sicht“ auf den Kern, so dass die unerwünschte Primärstrahlung (schnelle Neutronen- und Gammastrahlung) an den äußeren Enden der Strahlrohre weitgehend unterdrückt wird. Drei der Strahlrohre, darunter das soeben erwähnte, beginnen an einer „Kalten Quelle“, einem thermisch isolierten und auf 25 K abgekühlten Moderatorgefäß mit 2,5 kg flüssigem Deuterium. Ein anderes beginnt an einer „Heißen Quelle“, einem ebenfalls thermisch isolierten Block Graphit mit einer Temperatur von 2400 °C. Die in einen dieser beiden „Spektrumswandler“ diffundierenden Neutronen werden durch Stöße entweder weiter abgekühlt („kalte“ Neutronen) oder wieder etwas beschleunigt („heiße“ Neutronen). Zur lokalen Erzeugung hochenergetischer Spaltungsneutronen für Medizin und Technik dient ein „Uran-Konverter“, in



dem zwei Brennstoffplatten vor ein entsprechend ausgelegtes Strahlrohr geschoben werden können. In der Abbildung sind auch einige vertikale Bestrahlungskanäle und – ganz innen um das Brennelement herum – die Einfahrpositionen der fünf Abschaltstäbe zu erkennen.

Ein horizontaler Schnitt durch die Gesamtanlage – ebenfalls in Höhe des Kerns – ist in Bild 6 dargestellt. Das Reaktorgebäude ist in seinem unteren Teil als Quadrat mit 42 m Seitenlänge ausgebildet und umfasst hier die Experimentierhalle, in der die meisten Strahlrohre enden, mit ca. 1.000 m<sup>2</sup> nutzbarer Experimentierfläche. Im oberen Teil des Reaktorgebäudes befindet sich innen die sogenannte Reaktorhalle, von der aus das Reaktorbecken frei zugänglich ist und von der aus neben betrieblichen Handhabungen auch einige Nutzeranwendungen durchgeführt werden. In Bild 6 sind auch die Neutronenleiter und einige wissenschaftlichen Messinstrumente eingetragen. Bei den Neutronenleitern handelt es sich um lange rechteckförmige, evakuierte Kanäle aus hochwertig beschichtetem Glas, in denen die Neutronen mittels Totalreflexion über weite Entfernungen geführt werden können. Dadurch werden weitere



große Flächen der experimentellen Nutzung zugänglich gemacht, und es entstehen Messplätze. Im Bild ist links die ca. 11 m hohe, 60 m lange und 45 m breite „Neutronenleiterhalle“ zu erkennen, die zu einem späteren Zeitpunkt in die Halle des (stillgelegten) alten FRM-I verlängert werden soll (im Bild ganz links).

Zur besseren Vorstellung noch einige Fotos:

Bild 7 liefert einen Blick in das Reaktorbecken, wobei der Deckel der Stützkonstruktion oberhalb des Moderatortanks gut erkennbar ist.

Bild 8 vermittelt eine Ansicht aus der Reaktorhalle (Ebene 11,7 m) in das oben offene Reaktorbecken. Dieses „historische“ Foto zeigt das Einsetzen des ersten Brennelements in den geöffneten Zentralkanal Ende Februar 2004.

Bild 9 zeigt schließlich einen Blick in die Experimentierhalle (Ebene 0 m) mit dem Reaktorblock im Zentrum.

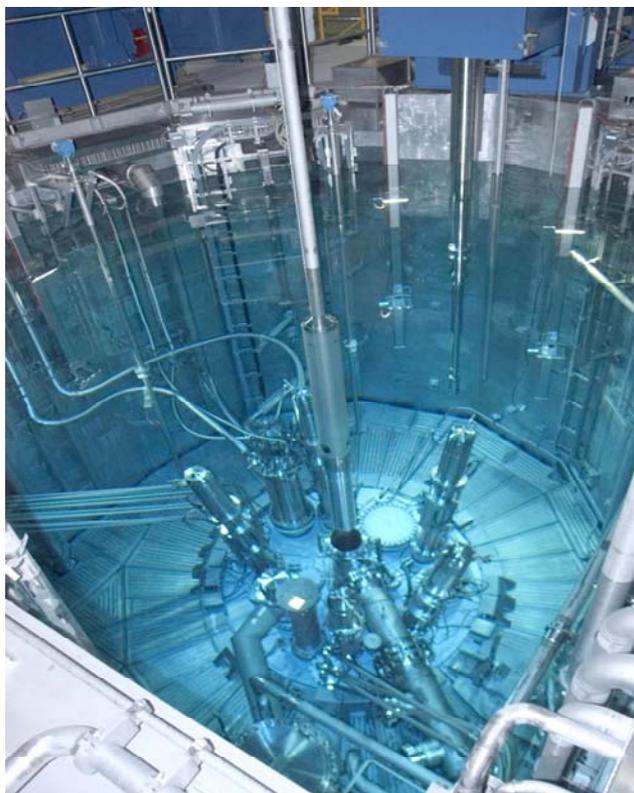


**Blick in das  
Reaktorbecken**

Jahrestagung Kerntechnik 2004



Bild 7



**Blick von oben in das  
Reaktorbecken**

**Einsetzen des  
Brennelements**

Jahrestagung Kerntechnik 2004



Bild 8



Experimentierhalle

Jahrestagung Kerntechnik 2004



Bild 9

## 2 Die lange politische und juristische Vorgeschichte

Wir blicken heute auf bald 25 Jahre Planung, Genehmigungsverfahren und Bau des FRM-II zurück. Betrübtlich dabei ist nur, dass mit jeder Verzögerung die Kosten in die Höhe schnellen und damit der in doppelter Hinsicht „kostbare“ wissenschaftliche Fortschritt gebremst wird. Ein paar Details dazu (siehe auch Bild 10):

Die ersten Planungsarbeiten für den FRM-II an der Technischen Universität München (TUM) gehen auf das Jahr 1980 zurück. 1993 wurde mit dem späteren Generalunternehmer Siemens/KWU der Antrag auf atomrechtliche Genehmigung gestellt. Die 1. Teilgenehmigung wurde im April 1996 erteilt. Im Oktober 1997 wurde die 2. Teilgenehmigung erteilt, die neben der Fertigstellung der gesamten Anlage auch deren Kalte Inbetriebsetzung umfasst.

Seit dieser Zeit wurde auch intensiv an der Vorbereitung des Antrags für die 3. atomrechtliche Teilgenehmigung gearbeitet, d.h. für die abschließende Genehmigung zur

## Ein deutsches Risiko: zu lange, zu ungewisse Entscheidungsprozesse Chronologie des FRM-II

<b>1980</b>	<b>erste Planungsarbeiten</b> zum Kompaktkern am TUM-Lehrstuhl Prof. Gläser
1981	Vorstellung des Konzepts auf Konferenz in den USA
Januar 1984	erste Fördermittel
1989 –1992	Begutachtung und Befürwortung durch den Wissenschaftsrat
November 1992	Vorstellung im Bayerischen Landtag
Februar 1993	Antrag auf atomrechtliche Genehmigung
<b>29. April 1996</b>	<b>1. atomrechtliche Teilgenehmigung</b>
<b>13. Oktober 1997</b>	<b>2. atomrechtliche Teilgenehmigung</b>
Frühjahr 2001	Bereit zur nuklearen Inbetriebsetzung
Dezember 2001	Abschluss der Beratungen Reaktorsicherheits-/Strahlenschutzkommission
<b>2. Mai 2003</b>	<b>3. atomrechtliche Teilgenehmigung</b>
<b>2. März 2004</b>	<b>erste Neutronen</b>
<b>ca. Sept. 2004</b>	<b>Beginn Nutzerbetrieb</b>

Jahrestagung Kerntechnik 2004



Bild 10

nuklearen Inbetriebsetzung und zum Routinebetrieb der Anlage. Wenn man davon ausging, dass die Stellungnahme des Bundesumweltministers (BMU) wie schon bei der 1. und 2. Teilgenehmigung auf der Basis von Entwürfen (und nicht erst der späteren Endfassungen) des TÜV-Gutachtens erfolgen würde, war nach dem vorliegenden Terminplan mit einer Erteilung der 3. Teilgenehmigung gegen Ende des Jahres 2000 zu rechnen.

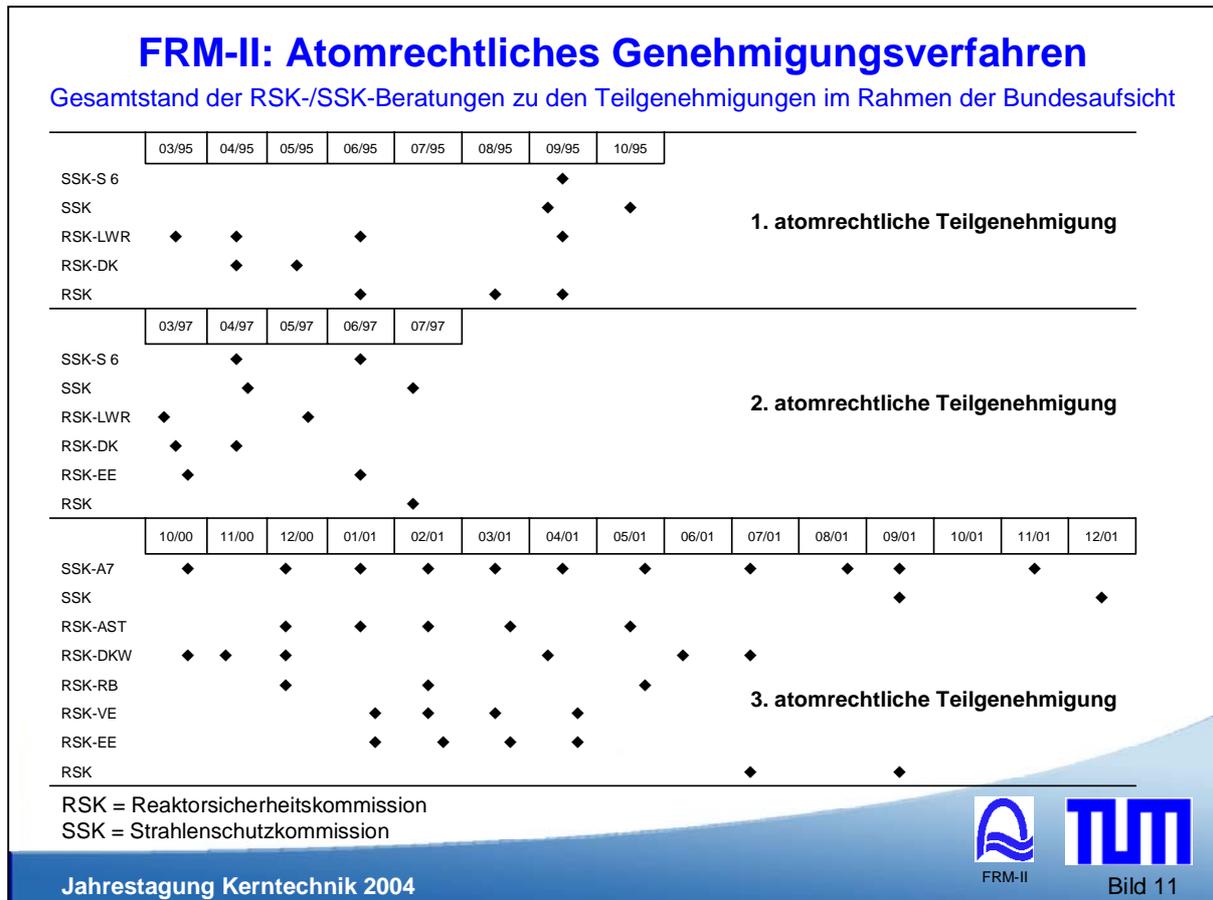
Der Ausgang der Bundestagswahl 1998 war jedoch mit einem politischen Wechsel verbunden, der zu einer schmerzlichen Verzögerung des Projekts FRM-II führen sollte. Wie Sie alle wissen, hatte sich die neu gewählte rot-grüne Bundesregierung dem Ausstieg aus der Kernenergie verschrieben und plante eine diesbezügliche Änderung des Atomgesetzes. Noch im Dezember 1998 löste ein Bundesumweltminister, den man sich seither leistet, die alte Reaktorsicherheitskommission (RSK) und Strahlenschutzkommission (SSK) auf, besetzte sie neu und erließ für beide neue Satzungen. Es war offenkundig, dass dies weiteren Gegenwind für den FRM-II bedeutete.

1999 setzte die Bundesregierung beim BMBF eine unabhängige „Expertenkommission“ ein. Extremforderung der Gegner in dieser Kommission war die Umrüstung des FRM-II von HEU (mit 93 % Anreicherung des spaltbaren Uranisotops U-235, wie vorgesehen) auf LEU (mit ca. 20 Prozent Anreicherung) noch vor seiner Inbetriebsetzung. Als Konsequenz dessen hätte das Brennelement neu konzipiert und vergrößert werden müssen, und es wäre ein mehr oder weniger großer Umbau der gesamten Reaktoranlage erforderlich geworden, so dass mit sehr hohen Zusatzkosten von mehr als 300 Mio. DM und einer Verzögerung der Inbetriebnahme um etwa acht Jahre (!) zu rechnen gewesen wäre. Noch dazu hätte sich der nutzbare Neutronenfluss deutlich verringert. Eine solche Entscheidung hätte nach unserer festen Überzeugung das „Aus“ bedeutet.

Die Abreicherung des Brennmaterials ist eine wissenschaftlich-technisch hochinteressante Herausforderung, der wir uns gerne stellen. Weniger angereichertes Uran bedeutet bei vergleichbarer Neutronenleistung logischerweise höhere Materialdichte, und das bei den gleichen hohen Sicherheitsstandards, wie wir sie heute haben. Also: wir brauchen eine anspruchsvolle Material- und Werkstoff-Forschung, und die kostet Geld, viel Geld. Wenn die Mittel bewilligt werden, engagieren wir uns.

Im Mai 2000 bekräftigte der Bundesumweltminister noch einmal seine Absicht, die Reaktorsicherheitskommission und die Strahlenschutzkommission erst dann erneut in das Verfahren einzubinden, wenn ihm der Entwurf des Bescheids zur dritten Teilgenehmigung und die diesem zugrunde liegenden Gutachten vollständig übersandt worden seien. Dieses vom bisher praktizierten, zeitlich parallelen Vorgehen abweichende Verfahren bedeutete einen weiteren Zeitverlust von rund einem halben Jahr für das Projekt.

Und die Diskussionen mit dem BMU und den beiden Kommissionen gingen weiter: Wie aus Bild 11 zu ersehen ist, begannen diese Beratungen im Oktober 2000 und dauerten das ganze Jahr 2001 über an. Das Verfahren zur 3. Teilgenehmigung nahm wesentlich mehr Zeit in Anspruch und umfasste viel mehr Sitzungen (nämlich insgesamt 37) als im Falle der 1. Teilgenehmigung (12 Sitzungen) und der 2. Teilgenehmigung (11 Sitzungen). Das war durchaus verwunderlich, da die Reaktoranlage ja



schon vorher im Konzept (1. Teilgenehmigung) bzw. im Detail (2. Teilgenehmigung) von beiden Kommissionen gründlich begutachtet worden war. Der große Zeitbedarf erklärt sich aus dem schwierigen politischen Umfeld, in dem sich das Projekt FRM-II seit dem Regierungswechsel und der damit zusammenhängenden Neubesetzung der Kommissionen bewegte. Schließlich konnten beide Kommissionen Ende 2001 ihre jeweiligen Empfehlungen in Plenarsitzungen verabschieden und offiziell an den BMU übergeben. Beide Empfehlungen enthielten zwar auch Vorschläge für Auflagen, was allgemein üblich ist, bestätigten aber, dass nach deren Erfüllung die Anlage FRM-II dem Stand von Wissenschaft und Technik entspricht und damit genehmigungsfähig ist.

Mit Schreiben vom 30. Januar 2002 übersandte der Bundesumweltminister (BMU) seine „Bundesaufsichtliche Stellungnahme zum Entwurf der 3. Teilgenehmigung“ an das Bayerische Umweltministerium (StMLU). In ihr stellte er zum großen Erstaunen der bayerischen Seite fest, dass der vorliegende Bescheidsentwurf als noch nicht erlassfähig angesehen werde. Insgesamt formulierte der BMU einen Katalog von 65

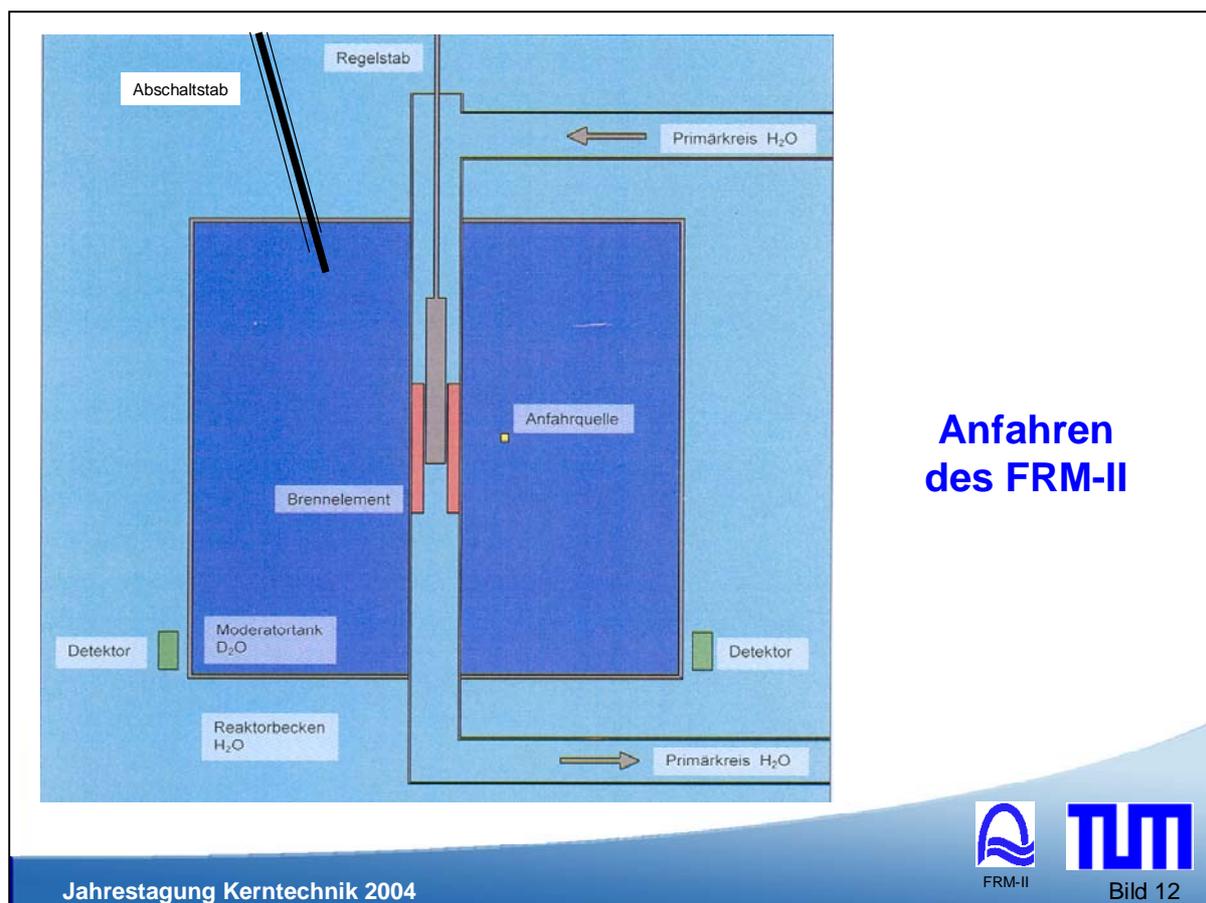
Forderungen, die deutlich über die schon von Reaktorsicherheitskommission und Strahlenschutzkommission formulierten Vorschläge hinausgingen! Auch wenn wir der Meinung waren, dass so gut wie alle diese Forderungen entweder nicht für die 3. Teilgenehmigung relevant oder schon im Verfahren zur 1. und 2. Teilgenehmigung geklärt und positiv entschieden worden waren, so mussten wir uns diesen Themen doch kurzfristig und mit großem Arbeitseinsatz zuwenden. Anfang Juli 2002 war das StMLU in der Lage, alle erforderlichen Unterlagen an den BMU zu übersenden.

Es sollte aber noch bis nach der Bundestagswahl 2002 dauern, bis vom BMU im Oktober 2002 eine erneute Liste mit zehn Fragen, insbesondere auch zu auslegungsüberschreitenden Störfällen, übermittelt wurde. Aber auch diese Unterlagen wurden von uns unverzüglich – mit ausnahmslos positivem Ergebnis – vorgelegt, so dass das StMLU im Februar 2003 alle neuen Dokumente einschließlich der Gutachten an das BMU übersenden konnte. Darauf übermittelte das BMU am 15. April 2003 endlich seine abschließende „Bundesaufsichtliche Stellungnahme“, so dass das StMLU die 3. Teilgenehmigung zügig ausstellen konnte.

### **3 Die dritte Teilgenehmigung und Inbetriebsetzung**

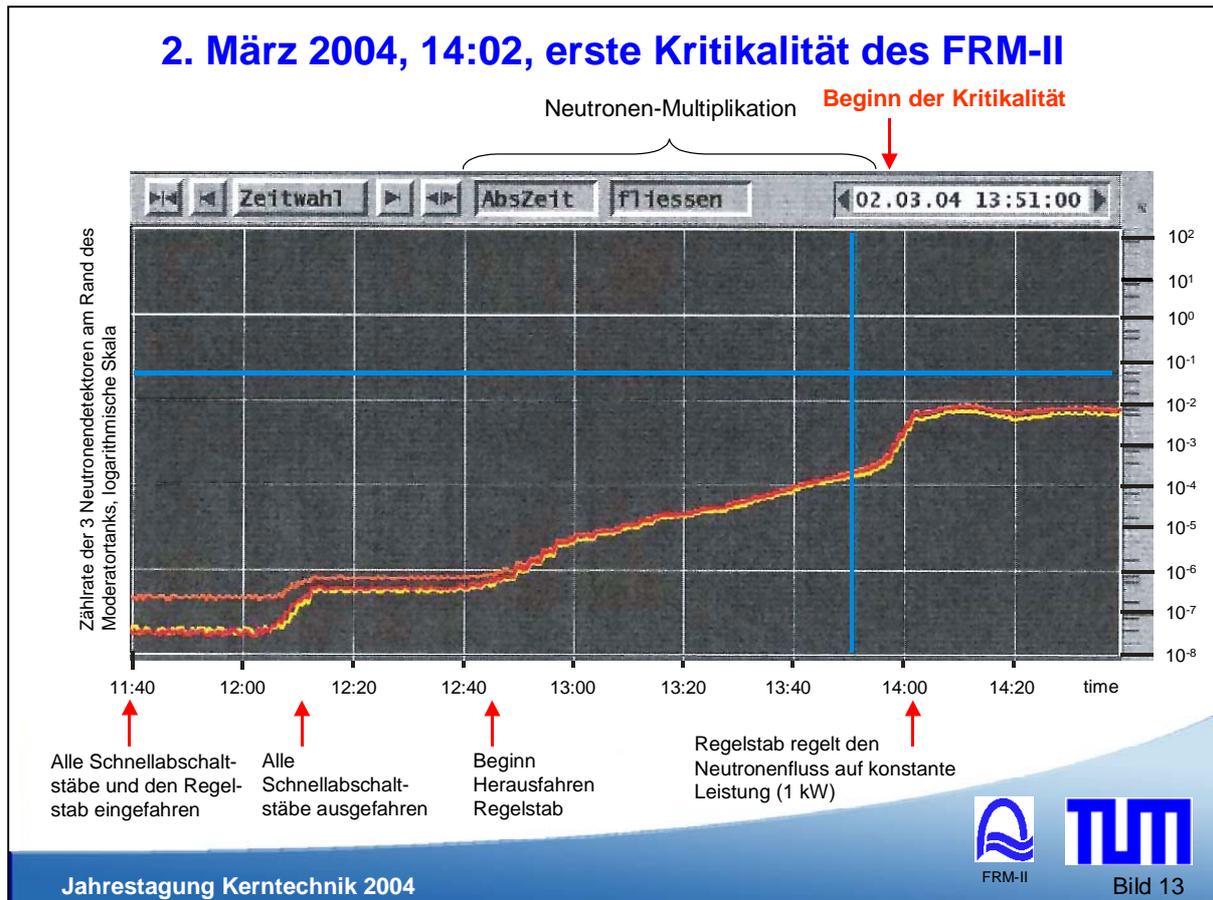
Unmittelbar nach der Erteilung der 3. atomrechtlichen Teilgenehmigung (d.h. der Betriebsgenehmigung) am 2. Mai 2003 konnten das gesamte Inventar an schwerem Wasser (rund 23 Tonnen) und die ersten Brennelemente aus Frankreich zum FRM-II transportiert werden. Wegen der vorherigen, politisch bedingten Stillstandszeit von fast 2 Jahren mussten viele der schon früher erledigten technischen Inspektionen und Funktionsprüfungen erneut durchgeführt werden. Dies führte zu einer erneuten Gesamtinspektion der Anlage.

Dann stand die Anlage FRM-II für die Aufnahme des nuklearen Betriebs bereit. Zuerst wurden die Brennelemente in einer „Unterkritikalitäts-Messstelle“ (UMS), die permanent im Keller des Reaktorgebäudes aufgebaut ist, vermessen. Dabei wurden auch von Euratom/IAEA die Uranmassen unter Safeguards-Gesichtspunkten noch einmal sehr präzise verifiziert. Nach dieser Überprüfung konnte das erste Brennelement in die Betriebsposition im Reaktor eingesetzt werden (wie bereits oben in Bild 8



gesehen). Da man ja noch keine praktische Erfahrung mit dem neuen Reaktor hatte und ganz betont auf Nummer „sicher“ gehen wollte, geschah dieses Einsetzen bei noch leerem Moderatortank. Bei eingefahrenen Abschaltstäben, aber voll gezogenem Regelstab, wurde der Moderatortank dann langsam mit  $D_2O$  gefüllt, wobei natürlich der Reaktor erwartungsgemäß weiterhin stark unterkritisch blieb. Die Neutronen wurden dabei durch eine „Anfahrquelle“ mit zeitlich konstanter Quellstärke geliefert, und die Messung erfolgte in den drei fest installierten Detektoren (siehe [Bild 12](#)). Anschließend wurden der Regelstab ein- und die fünf Abschaltstäbe voll ausgefahren – womit der Nachweis erbracht war, dass jedes der beiden redundanten Abschaltssysteme für sich allein in der Lage ist, den Reaktor schnell und dauerhaft abzuschalten.

Damit konnte am 2. März 2004 mit dem „kritischen Experiment“ begonnen werden. Bei einer grundsätzlichen Situation wie im letzten Bild ergab sich der in [Bild 13](#) gezeigte Verlauf der Zählraten in den drei Detektoren (man beachte die logarithmische Auftragung, d.h. die Zunahme der Zählraten auf der Skala rechts jeweils um Faktoren von 10). Zuerst waren noch alle Abschaltstäbe und der Regelstab eingefahren.



Um 12.10 Uhr wurden die fünf Abschaltstäbe nacheinander voll herausgezogen. Um 12.40 Uhr begann das langsame Herausfahren des Regelstabs bis zu seiner kritischen Stellung, die er kurz nach 14.00 Uhr erreichte. Bei insgesamt 820 mm Fahrweg des Regelstabs wurde diese kritische Stellung durch die reaktorphysikalischen Rechnungen mit einer Genauigkeit von wenigen Millimetern vorhergesagt. Ab diesem Zeitpunkt wurde die Reaktorleistung mit dem Regelstab konstant auf einem Wert von ca. 1 kW gehalten.

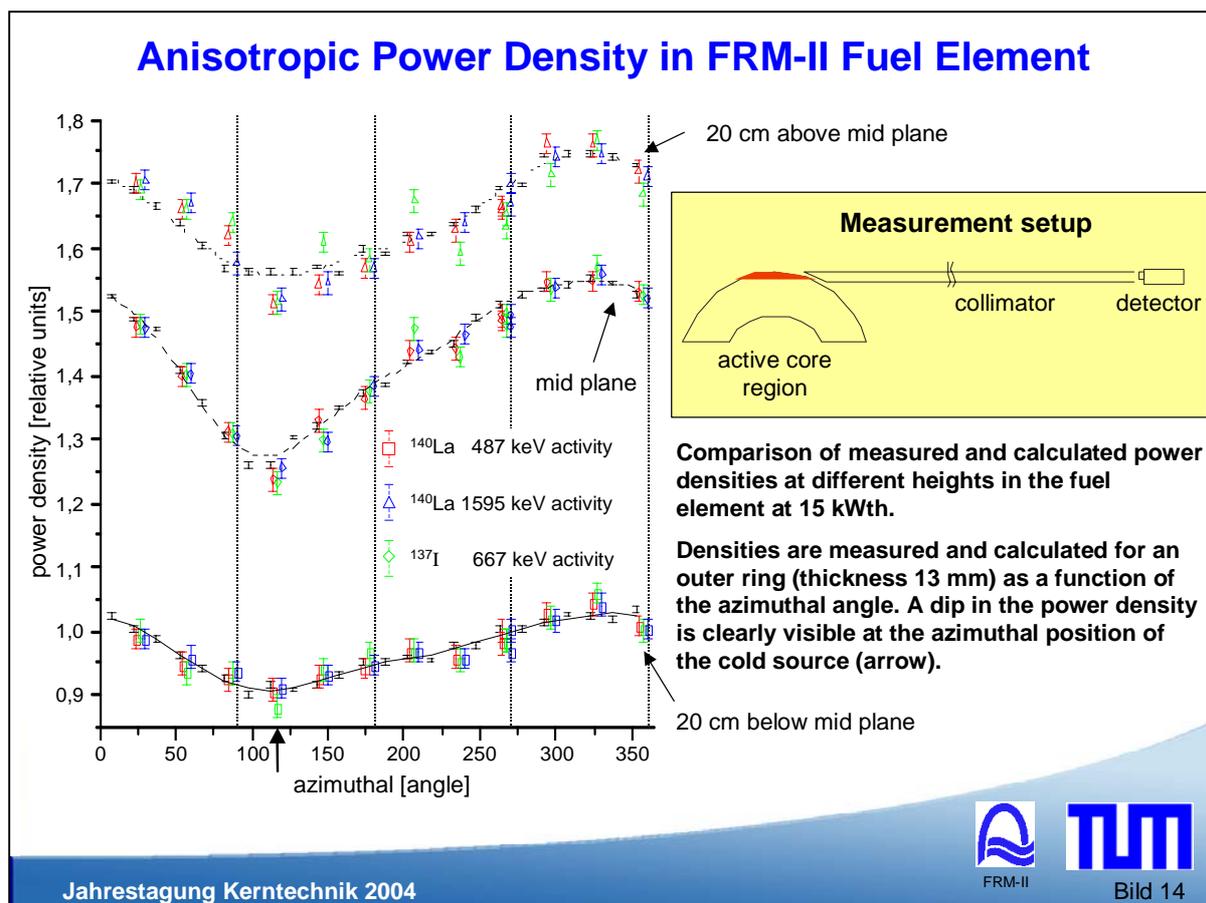
In der atomrechtlichen Betriebsgenehmigung des FRM-II war vorgegeben, dass bei diesen „Nullleistungsprüfungen“ die Reaktorleistung immer unterhalb von 200 kW verbleiben müsse. Es war aber durchaus nicht trivial, diese Bedingung auch einhalten zu können - denn die eigentliche „Leistungskalibrierung“ der Instrumentierung des FRM-II war durch die Messung der Temperaturerhöhung des Primärkühlwassers beim Durchströmen des Kerns vorgesehen, was aber erst bei wesentlich höheren Reaktorleistungen realistisch möglich war. Deshalb musste in dieser Phase, in der

die noch relativ willkürlichen Handeinstellungen der Instrumentierung durchaus zu einer auch um einen Faktor 2 falschen Leistungsbestimmung hätten führen können, auf alternative Verfahren zurückgegriffen werden.

Dazu wurde der Leistungsgrenzwert des Reaktorschutzsystems auf 100 kW eingestellt, also auf die Hälfte des zulässigen Werts. Dies geschah noch vor der 1. Kritikalität durch einen rechnerischen Vergleich der Neutronenproduktionsrate im Brennelement mit der bekannten Rate der Anfahrquelle. Anschließend wurde die Bestimmung der Reaktorleistung noch auf zwei weitere, von einander unabhängige Methoden vorgenommen: durch die Bestimmung des Neutronenflusses über die Aktivierung einer Goldprobe und durch eine adiabatische Aufwärmung des Kühlsystems bei abgeschaltetem Tertiärkühlkreis. Die Ergebnisse dieser drei grundsätzlich verschiedenen Leistungskalibrierungen stimmten innerhalb von nur 10 % miteinander überein, was u.a. auch die hohe Genauigkeit der reaktorphysikalischen Berechnungen sehr eindrucksvoll unterstreicht.

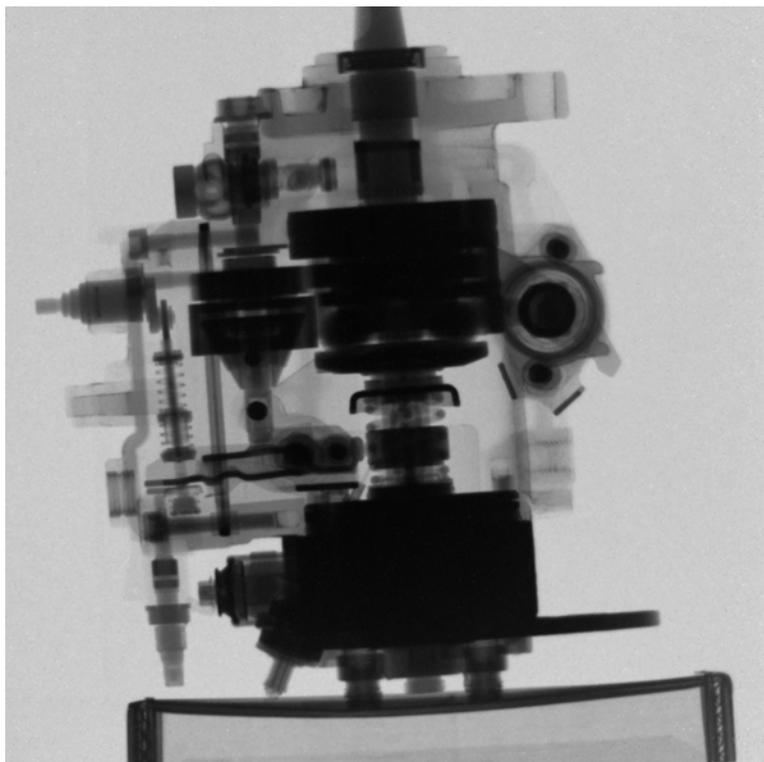
Eine weitere Auflage aus dem Genehmigungsverfahren bestand darin, verifizierende Messungen der Ortsabhängigkeit des Neutronenflusses auch im Innern des Brennelements durchzuführen. Wegen der Kompaktheit und Eingeschlossenheit des Brennelements war dies mit konventionellen Methoden nicht möglich. Deshalb fiel die Wahl auf ein vereinfachtes tomographisches Verfahren: das Brennelement wurde über zwei Tage mit 50 kW Reaktorleistung aktiviert und dann in das Absetzbecken des FRM-II verbracht, wo nach zwei Wochen Abklingzeit die lokale Konzentration des langlebigen Spaltprodukts Lanthan-140 über dessen Gamma-Aktivität vermessen werden konnte.

Auch über diesen „Gamma-Scan“, siehe Bild 14, wurden die neutronenphysikalischen Rechnungen sehr präzise bestätigt: so war z.B. der Einfluss der experimentellen Einbauten im Moderatortank (wie kalte Quelle etc.) auf die ansonsten rotationsymmetrische Verteilung des Neutronenflusses im Brennelement sehr gut dargestellt.



In dieser Zeit fanden auch schon die ersten Messungen der Nutzergemeinde statt. So zeigt Bild 15 die erste Radiographie am FRM-II: am 10. März 2004 wurde hier bei nur 50 kW Reaktorleistung die Einspritzpumpe eines Dieselmotors mit Neutronen „durchleuchtet“. Auch die ersten Messungen der Intensität der Neutronenstrahlen an den Strahlrohren und Neutronenleitern bestätigten sehr schön die Vorhersagen.

Im weiteren Verlauf der nuklearen Inbetriebsetzung des FRM-II wird nun die Reaktorleistung in Stufen bis zum Nominalwert von 20 MW erhöht werden. Zum Zeitpunkt dieser Tagung haben wir Prüfungen bis zu einer Leistung von 5 MW durchgeführt. Anschließend soll der Reaktor noch so lange mit dem ersten Brennelement weiter gefahren werden, bis ein voller Betriebszyklus von 52 Volllasttagen erreicht wird. Damit ist etwa im August 2004 zu rechnen. Erst dann wird die Verantwortlichkeit über die Anlage vom Generalunternehmer Siemens/Framatome-ANP GmbH auf die Technische Universität München übergehen.



**Erste Radiographie  
am FRM-II**

**10. März 2004**

Jahrestagung Kerntechnik 2004



Bild 15

#### **4 Zukünftige Nutzung des FRM-II**

Mit seinen vielfältigen Anwendungsmöglichkeiten in der Grundlagenforschung, Medizin und Industrie soll der FRM-II ein Kernpunkt für die weitere Entwicklung des Campus Garching sein, des wohl größten Standorts für Grundlagenforschung in Deutschland (siehe Bild 16).

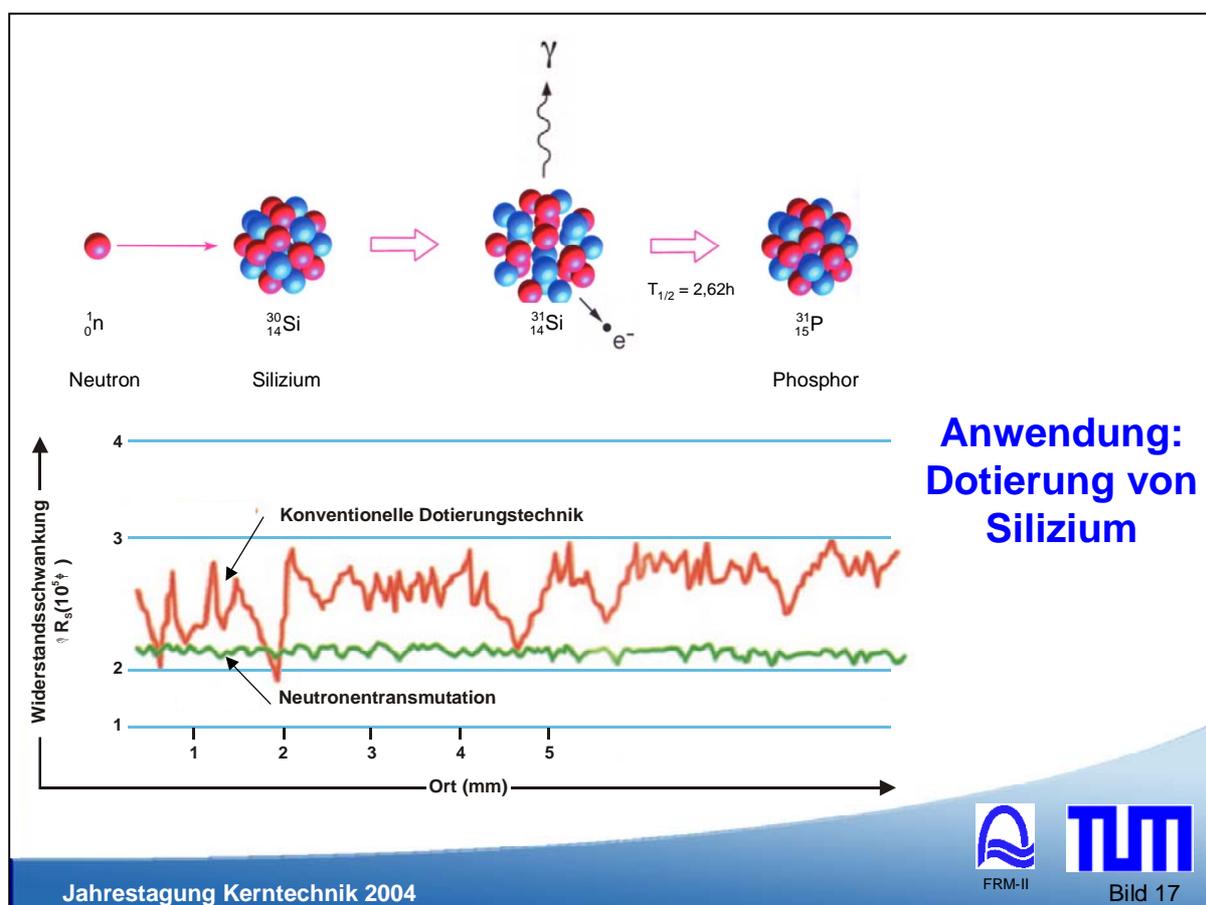
Die besondere Leistungskraft der Neutronenquelle liegt zwar in der hohen Neutronendichte, einmalig jedoch ist das breite Nutzungsspektrum der Neutronen. Durch Zusatzeinrichtungen können sie verlangsamt oder beschleunigt werden, wie sie für die unterschiedlichen Anwendungszwecke eben gebraucht werden. Ein weiteres wesentliches Merkmal des FRM-II ist die hohe Flexibilität seiner Einbauten. Alle Komponenten sind leicht zugänglich. Sie können nicht nur relativ einfach repariert, sondern auch gegen andere Bauteile ausgetauscht und somit an den derzeitigen Bedarf und an die zukünftigen experimentellen Anforderungen angepasst werden. Nur eine



hohe Flexibilität gewährleistet langjährige Attraktivität und Spitzenstellung der Anlage!

Die Bestrahlungseinrichtungen des FRM-II werden schwerpunktmäßig für die kommerzielle Nutzung eingesetzt. Sie erlauben Bestrahlungszeiten von einigen 100 Millisekunden bis zu einigen Wochen. Es können milligrammschwere Probenvolumina bis hin zu schweren Silizium-Einkristallen mit einem Durchmesser von 20 Zentimeter und einer Höhe von 50 Zentimeter bestrahlt werden.

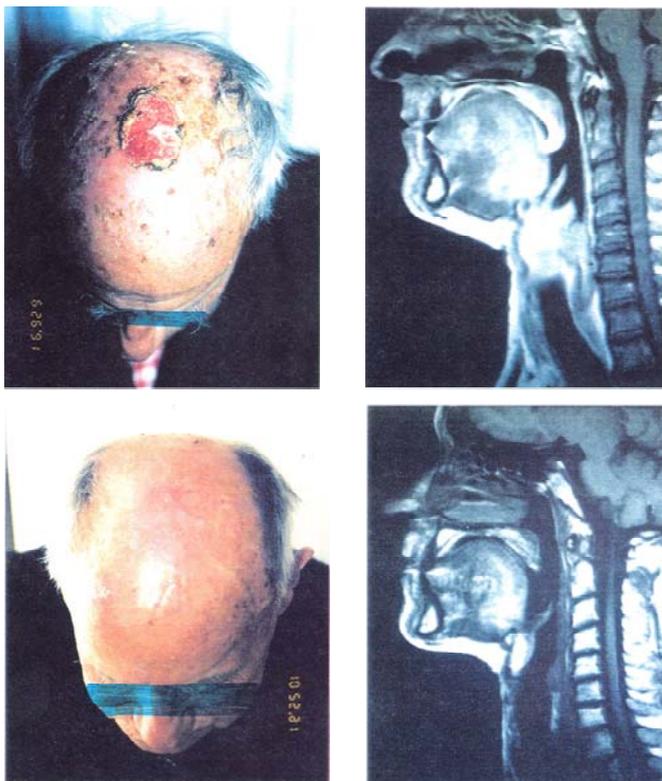
Ein schönes Beispiel für die zukünftige Zusammenarbeit mit der Industrie ist die Siliziumdotierung (Bild 17): Große Silizium-Rohlinge werden in einem sehr homogenen Feld von thermischen Neutronen bestrahlt, wobei sich das Isotop Si-30 in das stabile Isotop P-31 umwandelt. Die Phosphorverteilung bei dem so genannten Transmutationsverfahren ist äußerst homogen, so dass das Material bestens zur Herstellung von



Hochleistungsschaltelementen geeignet ist. Kein chemisches Verfahren kommt an die Dotierungshomogenität heran, die wir mit Neutronen erreichen.

Ein weiteres Anwendungsfeld ist die Tumortherapie, speziell die Bestrahlung oberflächennaher Tumoren mit hochenergetischen Neutronen, die Krebspatienten neue Hoffnung geben kann. In Bild 18 ist gut zu erkennen, wie nach der Bestrahlung ein großflächiger Hauttumor (links) bzw. ein ausgedehnter Kehlkopftumor (rechts) wieder verschwunden sind.

Neutronen sind ideal geeignet, die mikroskopischen oder atomaren Ursachen für die Funktionseigenschaft moderner Materialien zu erforschen. Konsequenterweise dienen die meisten Instrumente an Strahlrohren und Neutronenleitern den Materialwissenschaften. Ihre Anwendung umfasst praktisch alle Klassen von Materialien von Metallen und Halbleitern bis zu biologischen Proben. Auch Werkstücke von Verbrennungsmotoren (Bild 19) bis zu Brennstoffzellen werden untersucht. Man kann an neue Baumaterialien denken, an hochfesten Beton etwa, dessen Eigenschaften sich



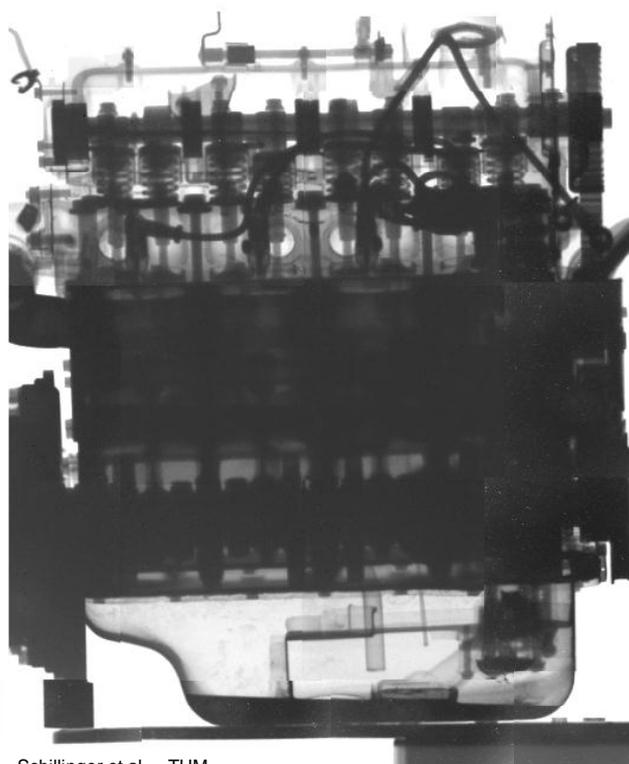
Molls, Kneschaurek - TUM

## Anwendung: Tumorthherapie



Bild 18

Jahrestagung Kerntechnik 2004



Schillinger et.al. – TUM

## Anwendung: Durchleuchten von Werkstücken

- in-situ Durchleuchtung eines Motors
- Sichtbarmachung des Einspritzprozesses
- Sichtbarmachung der Ölschmierung



Bild 19

Jahrestagung Kerntechnik 2004

wird interessant sein, die Zusatzstoffe (sog. Bauchemikalien) auf ihre strukturgebende Wirkung systematisch zu untersuchen.

So wie die Errichtung des Forschungsreaktors eine Gemeinschaftsleistung war, wird es auch seine Nutzung sein. Denn das Wesen der Neutronenforschung ist die Interdisziplinarität. Kaum ein Experiment, kaum eine Anwendung, die nicht unterschiedliche Fachexpertisen voraussetzt. Ein Beispiel ist die Strukturerfassung biologischer Systeme, bei denen es sich meist um supramolekulare Aggregate oder um langkettige Polymere handelt. Am FRM-II wird es möglich sein, sie in ihrer Dynamik zu erfassen, was besonders wichtig für das Funktionsverständnis ist. Wir werden Biochemiker und Mediziner flankiert von Methodenexperten sehen, denn natürlich genügt für die Anwendung von Neutronen keine simple Gebrauchsanweisung; gefordert ist vielmehr eine profunde Expertise. Der Umgang mit Neutronen ist eine Wissenschaft per se. Neutronen bringen Licht in die Strukturen der Stoffe des Lebens, deren Funktion von der Struktur, und deren Struktur von der exakten Lage der Wasserstoffbrückenatome abhängt. Und diese kann durch Neutronen weit genauer erfasst werden als von jeder anderen Methode.

In der Herstellung von Radioisotopen für medizinische Diagnose und Therapie wird der Schwerpunkt auf der Erzeugung bis jetzt nur schlecht zugänglicher Isotope liegen. Ziel ist es hier, durch geschickte Isotopenwahl die Strahlenwirkung zu erhöhen und gleichzeitig Nebenwirkungen weiter zu minimieren. Bestrahlt man z.B. Bor mit Neutronen, bilden sich Alpha-Teilchen. Unmittelbar im Tumorgewebe erzeugt, können sie dieses selektiv zerstören. So kommt es jetzt darauf an, dass Chemiker körperverträgliche Borverbindungen herstellen, die sich möglichst selektiv ans Tumorgewebe heften. Präparative Chemiker, Radiochemiker, Mediziner und Reaktorphysiker sind hier als Team gleichermaßen gefragt – typische interdisziplinäre Forschung.

Weitere wissenschaftliche Instrumente sind in Bau und werden in einem Rhythmus von ungefähr einem Instrument pro Jahr fertig gestellt. Etwa 20 Erstinstrumente warten auf ihre Inbetriebnahme im Sommer 2004 (Bild 20). Internationale Kooperationen betreiben den Aufbau der beiden umfangreichsten Experimentiereinrichtungen am FRM-II, den Munich Accelerator of Fission Fragments (MAFF) und die Ultra Cold

## Zusammenfassung und Ausblick

- **FRM-II ist Spitzeninstrument der Grundlagenforschung** in Physik, Chemie, Biologie, Ingenieurwesen, Geologie und Medizin
  - 20 Erstinstrumente warten auf Inbetriebnahme im Sommer 2004
- **Grundlagenforschung ist die Basis für Innovation:**
  - Eliteausbildung durch Spitzenforschung
  - Forschung im Vorfeld von Produkten/Produktion
  - Entwicklung neuer Produkte
- **FRM-II ist Brücke zwischen Grundlagen- und industrieller Forschung:**
  - 70 % Grundlagenforschung am FRM II (kostenfreier Zugang)
  - 30 % kommerzielle Nutzung (gegen Zahlung)

Jahrestagung Kerntechnik 2004



Bild 20

Neutron-Quelle (UCN). Für die ca. 800 Wissenschaftler, die in Deutschland schwerpunktmäßig mit Neutronen forschen, ermöglicht der FRM-II nach langer Zeit der Unterversorgung im eigenen Land eine führende Position im internationalen Wettbewerb. Den ca. 4.000 Neutronenforschern in Europa hilft der FRM-II, sich im wissenschaftlichen Wettbewerb mit Nordamerika und der pazifischen Region zu positionieren. Gerade seine Ausrichtung auf internationale Spitzenforschung wird wesentliche Impulse für die Weiterentwicklung des Forschungsstandorts Garching geben.

Der FRM-II steht als intensivste Neutronenquelle Deutschlands allen deutschen und internationalen Forschern offen. Die Strahlzeit für wissenschaftliche Zwecke wird gemäß dem Prinzip der höchsten wissenschaftlichen Attraktivität des einzelnen Forschungsprojekts verteilt, unabhängig von der nationalen Herkunft. Als universitäre Einrichtung ist der FRM-II in seiner Messzeitvergabe dem Prinzip der Ausbildung durch Spitzenforschung verpflichtet. Er wird deshalb insbesondere die Ausbildung von Eliten durch Diplom- und Doktorarbeiten auf dem Gebiet der Neutronenforschung fördern. Als Zentrale Wissenschaftliche Einrichtung der TU München bietet

der FRM-II in den Forschungs- und Ausbildungsschwerpunkten Physik, Chemie, Biologie, Lebenswissenschaften, Maschinenwesen, Geologie, Medizin und fächerübergreifend den modernen Materialwissenschaften einen einmaligen Standortvorteil.

Mit dem ehrgeizigen Ziel einer bis zu 30prozentigen Nutzung des FRM-II durch die Industrie will die TU München gezielt die Brücke zwischen Grundlagenforschung und industrieller Forschung und Produktion schlagen. Wichtigen Industriezweigen des Maschinenbaus, der Chemie, der Medizin und der Halbleitertechnik bietet er einmalige Möglichkeiten in Produktentwicklung und Produktionsoptimierung. Mit dem geplanten Industriellen Anwenderzentrum am FRM-II ist die Grundlage für wirtschaftliche Entwicklungen und künftige Arbeitsplätze gelegt.

## 5 Dank und Schluss

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Neutronenforschung jene Interdisziplinarität schafft, auf die es in der modernen Wissenschaft im besonderen Maße ankommt. So gesehen ist der neue Forschungsreaktor auch ein neues Zentrum von Naturwissenschaft, Technik und Medizin. Wie einst sein Vorgänger, das legendäre Atom-Ei, wird sich der FRM-II zu einem starken Magneten für die besten Wissenschaftler der Welt erweisen, darüber hinaus aber auch als Magnet für moderne Hochtechnologien unserer Industrie.

Der Beschluss der Bayerischen Staatsregierung zur Errichtung der Neuen Forschungs-Neutronenquelle in Garching war eine Sternstunde für die Wissenschaft, aber auch eine Sternstunde für eine Politik, die an die Zukunft glaubt und von der Tüchtigkeit ihrer Wissenschaftler überzeugt ist. Diese bayerische Politik mit Dr. Stoiber an der Spitze hat gezeigt, was aufrechter Gang bedeutet. Dafür danken wir. Wir haben es stets als hohe Anerkennung der Kompetenz und Zuverlässigkeit der Technischen Universität München verstanden, dass dieses weltweit beachtete Forschungsinstrument unserer Hochschule anvertraut wurde. Im Rückblick bewertet, war diese Neutronenquelle nur in Bayern möglich. Sie verschafft uns für den Wirtschaftsplatz Deutschland bis auf weiteres eine Monopolstellung ersten Ranges. Nutzen wir sie, das sind wir den Menschen schuldig!

Mein Dank geht an alle diejenigen, die das Projekt FRM-II auf seinem langen und steinigen Weg von den Anfängen bis zu seiner Vollendung begleitet haben. Als größtes wissenschaftliches Einzelprojekt im modernen Bayern ist die Neutronenquelle eine Botschaft an den Optimismus der Menschen: Unsere Zukunft gestalten wir mithilfe von Wissenschaft und Technik. Gerade in Zeiten knapper werdender Ressourcen müssen Schwerpunkte gesetzt werden. Ideologische Scheuklappen sind nicht mehr angebracht. Nur Spitzenforschung sichert uns und den kommenden Generationen eine Zukunft im harten globalen Wettbewerb. Möge daher der neuen Hochfluss-Neutronenquelle ein problemloser und erfolgreicher Betrieb über viele Jahrzehnte beschieden sein – zum großen Nutzen für Forschung, Technik, Lehre sowie industrielle und medizinische Anwendungen. In Dankbarkeit erinnern wir uns an Heinz Maier-Leibnitz, der das Atom-Ei vor über vierzig Jahren geplant und in Gang gesetzt hat. Er war ein Pionier mit Weitblick. Sein Name soll sichtbar erhalten bleiben.