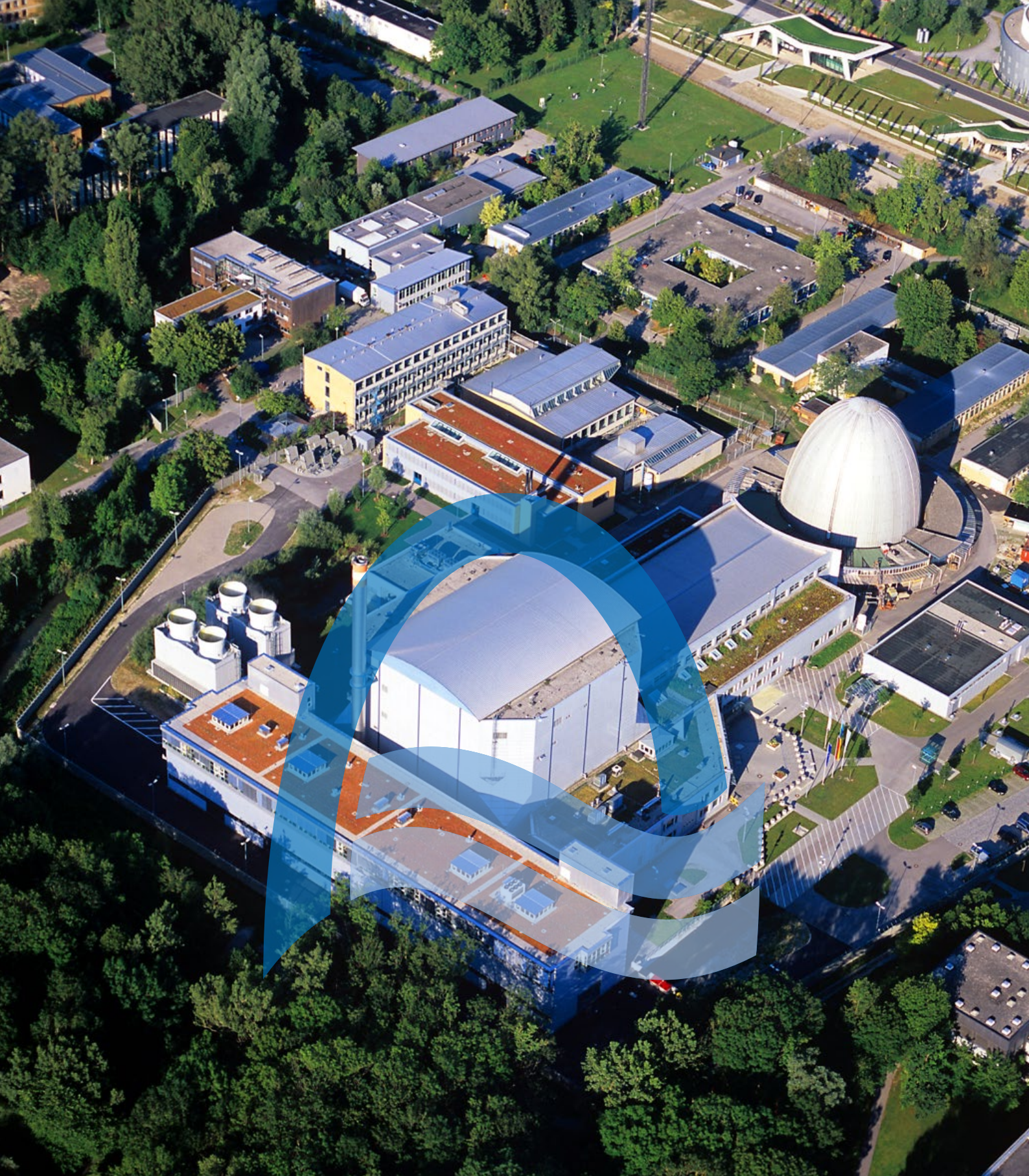




10 Jahre Forschungs-Neutronenquelle Heinz Maier-Leibnitz (FRM II)







Dr. Ludwig Spaenle
*Bayerischer Staatsminister
für Bildung und Kultus,
Wissenschaft und Kunst*

Die Forschungs-Neutronenquelle Heinz Maier-Leibnitz (FRM II) ist ein wichtiger Leuchtturm in der bayerischen Wissenschaftslandschaft. Die Technische Universität München als Betreiberin kann heute stolz auf das vergangene Jahrzehnt zurückblicken. Denn sie hat sowohl für einen sicheren Betrieb als auch exzellente Forschungsleistungen gesorgt.

Was damals gegen erhebliche Widerstände realisiert wurde, setzt heute Maßstäbe und zieht Spitzenforscher aus aller Welt an. Jährlich rund tausend Gastwissenschaftler aus dem In- und Ausland nutzen die Neutronen des FRM II für ihre Experimente. Nicht zuletzt der Blick auf die Drittmittelentwicklung unterstreicht seine herausragende wissenschaftliche Stellung.

Der unermüdliche Einsatz der Bayerischen Staatsregierung für den Bau des FRM II und der politische Mut, der hinter diesem gewaltigen Vorhaben stand, haben sich aus damaliger wie aus heutiger Sicht gelohnt. Mit der nachhaltigen finanziellen Förde-

rung sorgen wir für einen soliden und verlässlichen Rahmen, damit die Wissenschaft dieses Großgerät auch weiterhin erfolgreich nutzen kann.

Auch der Bund, der die Forschung am FRM II von Anfang an unterstützt hat, setzt sein Engagement mit dem neu gegründeten Heinz Maier-Leibnitz Zentrum konsequent fort. Die institutionelle Einbindung des Forschungszentrums Jülich und der Helmholtz-Zentren in Geesthacht und Berlin hat die nationale Dimension der Einrichtung erheblich gestärkt.

Auf europäischer Ebene ist die Garching Neutronenquelle größter Partner in einem Konsortium, das EU-weite Forschung mit Neutronen ermöglicht.

Viele Kunden haben zudem in den vergangenen Jahren die Neutronen aus Garching im industriellen Rahmen genutzt, beispielsweise um Fertigungsprozesse in der Automobilindustrie zu verbessern oder Materialien mit den Neutronen atomar genau zu charakterisieren und damit ihre Funktionalität

zu optimieren. Besonders beeindruckend ist hierbei die Dotierung von hochreinem Silizium für die Halbleiterindustrie. Mit rund zwölf Tonnen Silizium jährlich ist der FRM II ein Schwergewicht auf dem Silizium-Weltmarkt für Hochspannungs-Gleichstromübertragung.

Meine herzlichen Glückwünsche und mein Dank gelten den Wissenschaftlern, Ingenieuren, Technikern und Verwaltungsmitarbeitern der Forschungs-Neutronenquelle und des Heinz-Maier-Leibnitz-Zentrums. Gemeinsam ermöglichen sie Spitzenforschung mit diesem exzellenten Gerät. Für die Zukunft wünsche ich ihnen dazu alles Gute.

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'F. Juel', written in a cursive style.



**Prof. Dr. Dr. h.c. mult.
Wolfgang A. Herrmann**
*Präsident
Technische Universität München*

Sternstunde für die Wissenschaft

10 Jahre Forschungs-Neutronenquelle
Heinz Maier-Leibnitz

Die „Forschungs-Neutronenquelle Heinz Maier-Leibnitz“ (FRM II) steht für Spitzenforschung, Interdisziplinarität und Internationalität. Sie steht aber auch für eine Politik, die mit aufrechem Gang gegen öffentliche Widerstände ihre gesetzten Ziele mutig ansteuert und dann auch erreicht. Die erste Regierungserklärung von Ministerpräsident Dr. Edmund Stoiber am 30. Juni 1993* sollte sich als Sternstunde für die Wissenschaft erweisen: Das damals angekündigte Großforschungszentrum in Garching wurde verwirklicht, Nukleus einer glänzenden Campuserwicklung.

Aus einer bayerischen Initiative ist die deutsche Hochfluss-Neutronenquelle geworden, die es kraft ihres breiten Anwendungsspektrums mit allen Konkurrenten weltweit aufnimmt. Mit einer technisch neuartigen Konfiguration des Brennelements konnte ein intensiver und gleichzeitig homogener Neutronenfluss in Kernnähe erreicht werden. Darüber hinaus hat der FRM II sicherheitstechnisch neue Standards gesetzt. Was mit dem legendären „Atom-Ei“ (1957) im Zeitalter des „deutschen Wirt-

schaftswunders“ begonnen hatte, ist mit der neuen, leistungsfähigeren Neutronenquelle weit über sich hinausgewachsen.

Die Initiatoren und Akteure von damals haben sich in die Annalen der Wissenschaftspolitik geschrieben. Die großen Herausforderungen der Gesellschaft vorausahnend, haben sie Weitblick von gewaltiger Dimension bewiesen. Gleichzeitig haben sie gesät, was sie selbst nicht mehr ernten können. Sie vertrauen auf die Innovationskraft der kommenden Generationen. Jede Generation steht auf den Schultern der Vorgänger, und sie muss deshalb auch einen weiteren Horizont haben. Das ist es, was wir von jenen erwarten, die nach uns kommen.

Je kräftiger der neue Wissenschaftsmagnet FRM II Spitzenkräfte aus aller Welt anzog, umso ruhiger wurde es um die Bedenkenträger und Gegner von damals. Eine exzellente Nutzergemeinde hat die Furcht vor dem „Millionengrab“ ins Nichts zerstreut. Die TUM hat bewiesen, dass sie ihrer Verantwortung als Betreiberin einer hochkomplexen technischen Anlage vollumfänglich gerecht wird: von der effizienten Nutzung des Neutronenspektrums bis zur skrupulösen Sicherheitstechnik, die stets Vorrang hat.

*<http://www.sueddeutsche.de/bayern/ende-der-aera-stoiber-der-treibstoff-des-erfolgs-1.793863>

Hoch waren die Innovationskosten (rd. 440 Mio. Euro), weitestgehend vom Freistaat Bayern getragen. Sie haben sich schon deshalb gelohnt, weil der FRM II mit seinem Leistungsspektrum eine internationale Alleinstellung hat. In Garching können anspruchsvolle Fragestellungen aus Wissenschaft, Technik und Medizin bearbeitet werden, für die nur hier die reaktorspezifischen Voraussetzungen erfüllt sind. Die beträchtlichen Betriebskosten (ca. 40 Mio. Euro p.a.) teilen sich Bund und Land, unter Beteiligung des Forschungszentrums Jülich und des Helmholtz-Zentrums Geesthacht. In dieser Konstellation ist die gesamte deutsche Neutronenforschung jetzt in Garching konzentriert.

Die Anwendungsfelder umfassen die Grundlagenforschung (z.B. Neutronen- und Hadronenphysik) ebenso wie die Angewandte Forschung (z.B. Strukturchemie komplementär zur Röntgenbeugung, Material- und Werkstoffentwicklung/-prüfung) und den industriellen Bedarf (z.B. homogene Halbleiterdotierung). Auf den Weg gebracht ist die Produktion des Radioisotops Technetium-99m, das in der Medizin breiteste Anwendungen findet und einen lukrativen gesamteuropäischen Markt in Aussicht stellt, zumal die älteren (und kleineren) Neutronenquellen nicht mehr konkurrenzfähig sind.

Vor 10 Jahren nicht vorauszusehen, hat sich die Neutronenquelle als überaus wertvolles Instrument für den TUM-Exzellenzcluster „Origin and Structure of the Universe“ (2006/2012) erwiesen. Hinzugekommen ist aber auch die Batterieforschung, in Deutschland und Europa über Jahrzehnte vernachlässigt, mit ihrer zentralen Bedeutung in der Energieforschung. Mit der MUNICH SCHOOL OF ENGINEERING (MSE) hat die TUM eine flankierende Forschungseinrichtung geschaffen, in der die gesamte Energieforschung der Universität gebündelt ist.

„Neutronen sind Licht!“ So hatte ich meine Eröffnungsrede für die Neutronenquelle vor 10 Jahren betitelt. Möge die Wissenschaft dieses einzigartige Licht nutzen für neue Erkenntnisse, die der Zivilgesellschaft zum Vorteil und Segen gereichen! Möge die Neutronenquelle inmitten ihrer internationalen Nutzergemeinde auch zur Völkerverständigung beitragen, jenseits aller nationalen, kontinentalen und kulturellen Grenzen, als eine der wichtigsten Aufgaben der Wissenschaft!

Lothar A. Ulbrann



Grußworte	4
Vorgeschichte bis zur Betriebsgenehmigung	11
Der lange Weg zum FRM II – kurz gefasst	12
Betrieb des FRM II von 2004 bis 2014	21
Von der IBS zur WKP - 10 Jahre Betrieb des FRM II	22
Neutronen für die Wissenschaft	33
Instrumente für Forscher aus aller Welt	34
Zukunftsmaterialien - Grundlagenforschung mit Neutronen	40
Industrielle und Medizinische Nutzung	51
Bauteilprüfung und Materialentwicklung	52
10 Jahre kommerzielle Nutzung am FRM II	58
Neutronen für die Medizin	64
In Memoriam	69
Impressum	70

Hannelore Gabor, Erste Bürgermeisterin der Stadt Garching seit 2008

„Das Atom-Ei war die Keimzelle für einen einzigartigen Forschungscampus hier in Garching. Ich wünsche mir, dass der FRM II ebenso die Keimzelle für herausragende wissenschaftliche Ergebnisse ist und dass er in zehn Jahren – wie ich bereits bei der Eröffnung gesagt habe – dann FRG II (G für Garching) heißt. Garching ist im Hinblick auf den Forschungsreaktor ein Standort mit Weltgeltung.“



Manfred Solbrig, Bürgermeister der Stadt Garching 2002 bis 2008

„Das „Atom-Ei“ hat seit 1957 bereits ganz erheblich zur Entwicklung der Stadt Garching und des Forschungsstandorts beigetragen. Einen ähnlichen Schub erwartete man sich langfristig auch vom FRM II. Ich habe daher diese Forschungseinrichtung immer unterstützt. Die Auswirkungen des FRM II werden die Entwicklung der Stadt noch lange Zeit wesentlich beeinflussen. Die hohen Erwartungen der Wissenschaft haben sich bereits jetzt in vielen Bereichen erfüllt.“

Jürgen Großkreutz, Ministerialdirigent im Wissenschaftsministerium 1968 bis 2004



„Der FRM II hat wie kein anderes Projekt die letzten 15 Jahre meines Berufslebens geprägt und war zugleich eines meiner größten Erfolgserlebnisse. Mich hat die Perspektive fasziniert, dass er nicht vom Bund, sondern von einem Land zusammen mit einer Universität geplant, finanziert, gebaut und betrieben werden wird. Außerdem war ich je länger je mehr von der fachlichen Notwendigkeit der hier geplanten Materialforschung überzeugt. Und schließlich gab es für mich noch einen sportlichen Aspekt: Je größer die Widerstände wurden, desto mehr wuchs auch mein Ehrgeiz, den FRM II zu realisieren. Rückblickend war der FRM II eine unglaubliche Erfolgsgeschichte eines Netzwerks von Menschen, die alle für das gleiche Ziel gekämpft haben. Die politische und wissenschaftliche Welt hat damals sehr gestaunt: „So etwas ist eben nur in Bayern möglich!“, sagte anerkennend ein hochrangiger Wissenschaftspolitiker.“



Vorgeschichte bis zur Betriebsgenehmigung

Wie jedes Großprojekt hat auch der Bau des „Forschungs-Reaktors München II“ (FRM II) eine lange Geschichte. Die Anfänge fallen schon ins Jahr 1979, als Prof. Wolfgang Gläser, wissenschaftlicher Direktor und Nachfolger von Prof. Heinz Maier-Leibnitz, mich (damals gerade frisch habilitiert) beauftragte, als Projektleiter eine wesentliche Verbesserung der Nutzungsmöglichkeiten des in die Jahre gekommenen FRM („Atom-Ei“) zu planen. Der Bedarf an einer leistungsfähigeren nationalen Neutronenquelle war längst offensichtlich.

Garchingener Kompaktkernkonzept weltweit bekannt

Um eine höhere Neutronenflussdichte zu erreichen, entwickelten wir ein neues physikalisch-technisches Konzept, das einen sehr kompakten Reaktorkern mit Urandichtestaffelung und eine Leistung von „nur“ 20 MW vorsah. Das war immerhin fünf Mal mehr als die des FRM, aber nur rund ein Drittel von der des internationalen Hochflussreaktors RHF in Grenoble. Zusätzliche Vorteile des neuen Konzepts waren ein sehr geringes Risikopotential, weniger radioaktive Abfälle und geringere Kosten. Unseren Modernisierungsvorschlag stellten wir drei Jahre später international vor, er ist unter dem Namen „Garchingener Kompaktkernkonzept“ weltweit bekannt geworden.

Aus dem Ende der Spallationsquelle wird der Anfang des FRM II

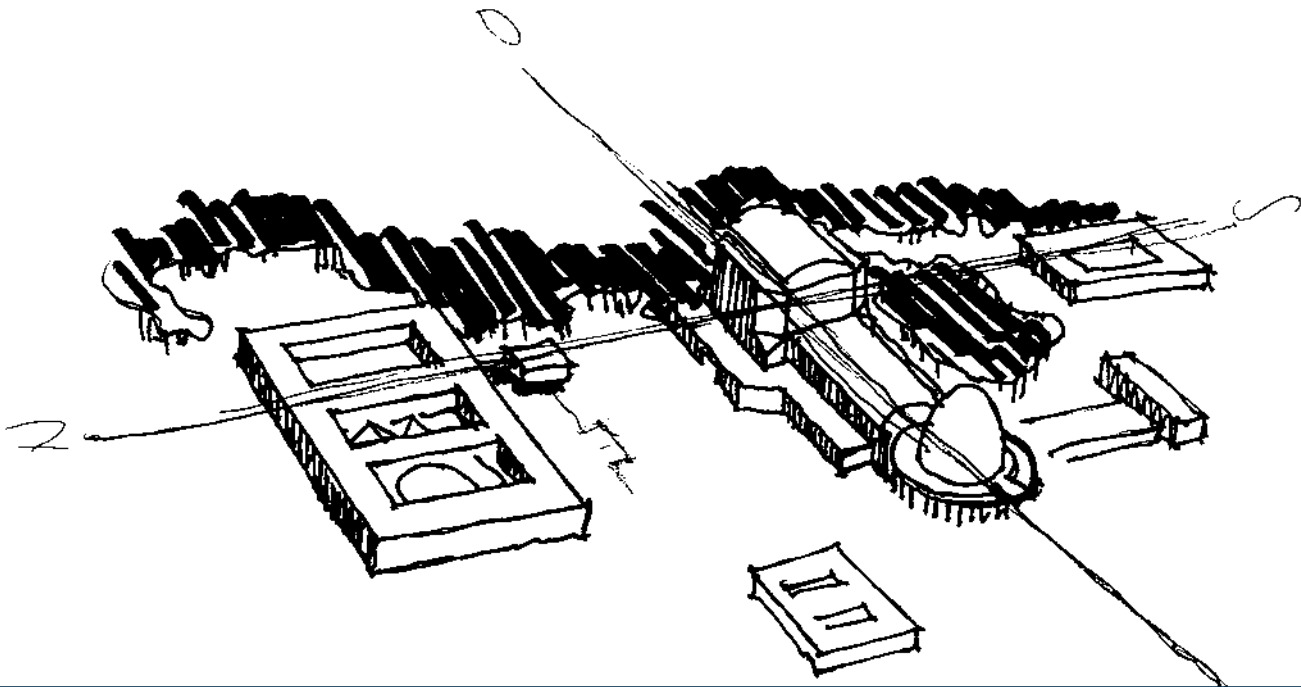
Anfang 1984 bewilligte das damalige „Bundesministerium für Forschung und Technologie“ Fördermittel für eine Machbarkeitsstudie des neuen Kompaktkernkonzepts. Im gleichen Zeitraum, nämlich von 1974 bis 1985, flossen gewaltige Fördermittel in das Projekt einer großen nationalen Spallationsneutronenquelle. 1985 wurde dieses Projekt eingestellt, weil es noch erhebliche langfristige Entwick-

lungsarbeiten erforderte und enorm hohe Kosten verursachte. Durch die umfangreichen Vorarbeiten an unserer Technischen Universität München (TUM) waren damit die Chancen für eine nationale Neutronenquelle am Standort Garching wesentlich gestiegen.

Neben der technisch grundsätzlich möglichen Realisierbarkeit des Kompaktkernkonzepts ergaben die vorbereitenden Studien auch, dass eine bloße „Ertüchtigung“ des FRM durch Umbau nicht sinnvoll war. Die Arbeitsgruppe „Zukunft der Neutronenforschung“ und der Sachverständigenkreis des Bundesministeriums empfahlen deshalb 1986 den Neubau eines Forschungsreaktors mit dem Kompaktkernkonzept. Bund und Land stellten zügig Finanzmittel für die konkrete Vorplanung zur Verfügung. Im zuständigen bayerischen Wissenschaftsministerium wurde das Projekt vom späteren Ministerialdirigenten Jürgen Großkreutz immer sehr aktiv unterstützt – ebenso in der Hochschulleitung der TUM vom damaligen Präsidenten Prof. Otto Meitinger und seinem Referenten Dr. Rainer Kuch. Unsere Anlagenplanung sah ein „Tandem“ aus FRM/neuer Neutronenleiterhalle/neuer FRM II vor. Aus einer Handskizze des TUM-Architekten Prof. Fred Angerer entstand eine erste Vorstellung der Architektur dieser neuen Forschungs-Neutronenquelle FRM II.

FRM II für Forschung, Industrie und Medizin

Der geplante Neubau eröffnete die einmalige Chance, ausreichend Platz nicht nur für traditionelle, sondern auch für ganz neue experimentelle Einrichtungen zu schaffen. Von Anfang an trafen sich deshalb die deutschen Neutronenforscher unter der Leitung von Dr. Erich Steichele, um die wissenschaftlichen Instrumente der zukünftigen Neutronenquelle zu diskutieren. Bereits in dieser Phase wurde entschieden, dass der zukünftige



Handskizze von Architekt Prof. Fred Angerer als Entwurf für das Ensemble aus „Atom-Ei“ und neuem Reaktorgebäude.

FRM II nicht nur der Wissenschaft dienen sollte, sondern auch der Industrie und Medizin. Das war damals ein Novum, das dem Freistaat Bayern allerdings sehr wichtig war. Dennoch geriet das Projekt wegen ungeklärter Finanzierung immer wieder ins Stocken.

Die TUM zusammen mit der Firma INTERATOM, einer Siemens-Tochter, legte externen Experten 1991 einen Vorentwurf der Anlagenplanung und des Sicherheitsberichts vor, die dann noch mehrfach überarbeitet wurden. Wichtiger Bestandteil waren die rein passiv wirkenden Sicherheitsmerkmale des FRM II, die dazu führen, dass sich der Reaktor z.B. bei einem möglichen Wasserverlust im Kühlkreislauf oder im Moderator tank sofort selbst abschaltet.

Öffentlichkeitsarbeit von Anfang an

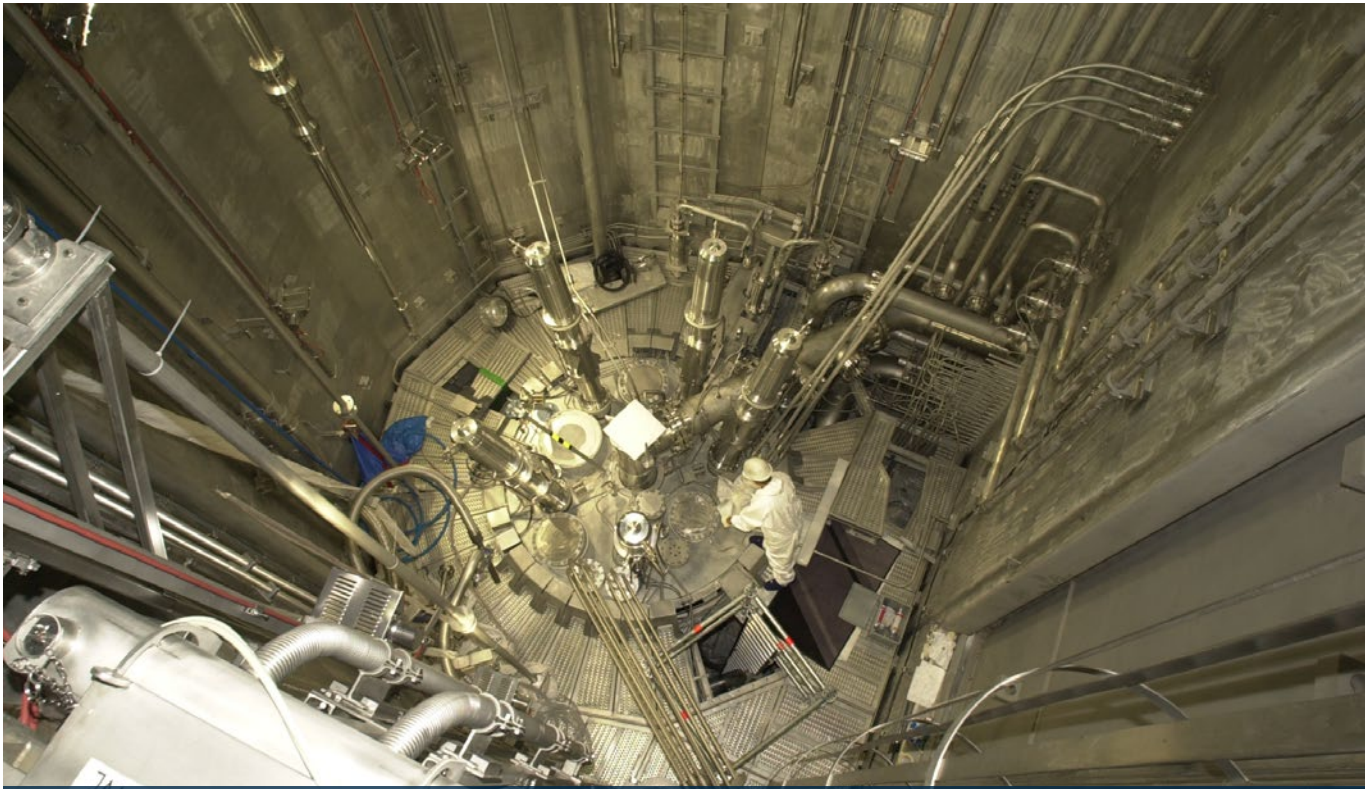
Die TUM als zukünftige Betreiberin des FRM II nahm zu jedem Zeitpunkt die vorbehaltlose Information und Aufklärung der Öffentlichkeit sehr

ernst: so wurden 1990 zunächst die Bürgermeister der umliegenden Gemeinden informiert, 1991 der Garchinger Stadtrat und die Bürger, die sich auf Initiative des Bund Naturschutz zu einer Podiumsdiskussion über den geplanten Forschungsreaktor einfanden. Eine erste Broschüre zu Konzeption und Sicherheit entstand bereits in diesem frühen Stadium.

1991 berief die TUM Prof. Klaus Schreckebach und 1992 Prof. Winfried Petry, die das Projekt FRM II fortan überaus engagiert verstärkten. Nach intensiven Diskussionen bei der Bayerischen Staatsregierung und im Landtag beschloss der Bayerische Ministerrat 1993, dass die Antragsteller TUM und Siemens AG die Genehmigungs- und Raumordnungsverfahren einleiten sollten. Der neue Bayerische Ministerpräsident Dr. Edmund Stoiber bekannte sich in seiner Regierungserklärung im Juni 1993 zur Erneuerung des Forschungsreaktors, die aus Mitteln der „Offensive Zukunft Bayern“ finanziert werden sollte.



Blick in den Kellerbereich des Reaktorgebäudes (1997).



Blick in das noch nicht mit Wasser gefüllte Reaktorbecken.

Einwände der Bürger werden berücksichtigt

Relativ einfach gestaltete sich der Antrag auf Durchführung eines Raumordnungsverfahrens, der bereits nach einem Dreivierteljahr unter der Auflage, ökologische Ausgleichsflächen auszuweisen, genehmigt wurde. Der atomrechtliche Antrag auf Errichtung und Betrieb des FRM II war erheblich umfangreicher. Allein die erste Teilgenehmigung führte schon zu hunderten von offiziellen Dokumenten, die mehrere Aktenordner füllten. Parallel dazu gründete Gert von Hassel eine eigene Arbeitsgruppe „Öffentlichkeitsarbeit“ innerhalb der inzwischen auf sieben Personen angewachsenen Projektgruppe. Er koordinierte sehr erfolgreich Medienkontakte, Informationsveranstaltungen und eine Imagekampagne, denn eine lokale Bürgerinitiative gegen den Bau des FRM II gab es bei al-

ler offiziellen Unterstützung auch. Das bayerische Umweltministerium (StMLU) führte die öffentliche Erörterung im Mai 1994 in der riesigen Rudi-Sedlmayer-Halle in München durch. Insgesamt wurden 14 Einwände von Gemeinden, 304 Einwendungen von Individuen oder Personengruppen und 50 000 Unterschriften gegen den FRM II vorgelegt, die von der Projektgruppe bearbeitet werden mussten. Alle diese Einwände flossen in die Genehmigung der Behörden ein und führten zu noch weiter erhöhten Schutzmaßnahmen: das Gebäude des FRM II erhielt u.a. durch auf 1,80 m verdickte Außenwände einen Vollschutz gegen Flugzeugabsturz. Damit war er der erste Forschungsreaktor weltweit, der so ausgerüstet war.

Brennelement auf Herz und Nieren getestet

Die endgültige Entscheidung für den Bau fiel Mitte 1994, nachdem aus dem Projekt FRM II nun tatsächlich ein Großprojekt geworden war und Bund und Land die Finanzierung zugesagt hatten. TUM-Präsident Prof. Meitinger war bereit, die Rolle des Bauherren zu übernehmen, was für die Hochschule damals ein absolutes Novum darstellte. Die Siemens AG schloss als Generalunternehmer den Vertrag über die Lieferung der eigentlichen Forschungsreaktoranlage, deren Gesamtbaukosten auf 720 Mio. DM gedeckelt wurden. Parallel dazu stellte die französische Brennelementfirma CERCA einen ersten Dummy-Prototyp des neuen Kompaktbrennelements her, das auf einem Teststand der Ruhr-Universität in Bochum auf Herz und Nieren geprüft wurde. 1995 wurde als Projektleiter in der Bauphase Dr. Anton Axmann vom Hahn-Meitner Institut Berlin gewonnen, der beim Umbau des dortigen Forschungsreaktors BER wertvolle Erfahrung mit solchen Großprojekten gesammelt hatte – ich war dann sein ständiger Vertreter. Die Projektgruppe der TUM vergrößerte sich auf 37 Personen.



Prof. Dr. Klaus Böning, Dr. Anton Axmann und TUM-Präsident Prof. Dr. Dr. h.c. mult. Wolfgang A. Herrmann (v.l.) im Gespräch auf der Baustelle.

Vor Ort in Garching warteten weitere Genehmigungsverfahren: zum Baurecht, zum Wasserrecht sowohl während der Bauphase als auch für den späteren Betrieb, ganz zu schweigen vom atomrechtlichen Verfahren, für das wegen einer Gesetzesänderung eine weitere Umweltverträglichkeitsprüfung erforderlich wurde.

Baudurchführung und erster Tag der offenen Tür

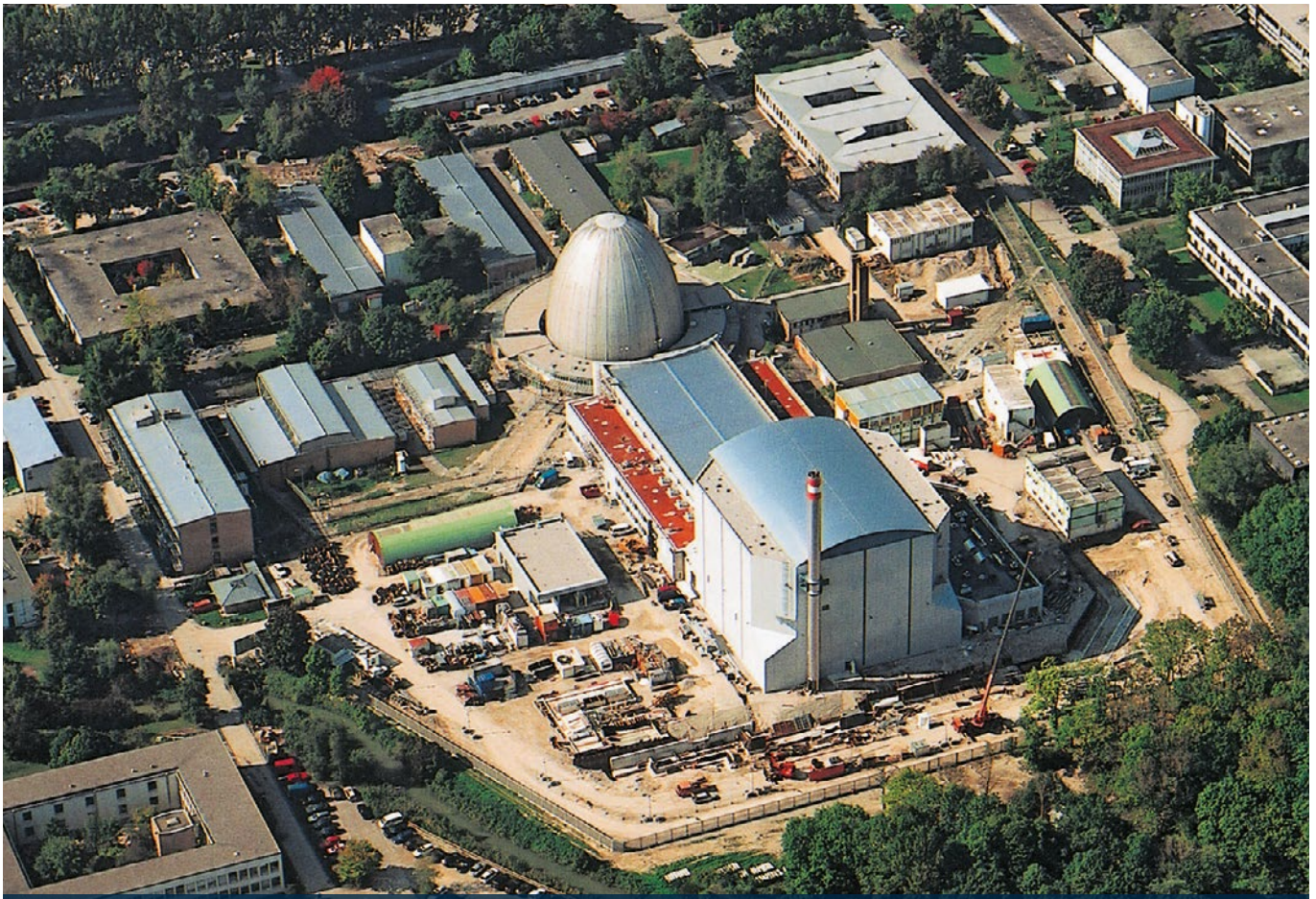
Am 1. August 1996 machten Ministerpräsident Stoiber, Wissenschaftsminister Zehetmair und der neue TUM-Präsident Prof. Herrmann den ersten Spatenstich, mit dem das größte Bauvorhaben in der Geschichte der TUM endlich starten konnte. Dem lag die erste atomrechtliche Teilgenehmigung zur Errichtung nur des Reaktorgebäudes zugrunde, gegen die verschiedene Organisationen und Behörden Klagen erhoben. Wie die früheren Einwände wurden auch diese abgearbeitet oder zurückgezogen, so dass Wissenschaftsminister Zehetmair im Januar 1997 den Grundstein legen konnte, nachdem die 2,70 Meter dicke Bodenplatte des Gebäudes aus Beton gegossen war. Die TUM und die Siemens AG beantragten noch 1996 die 2. atom-



Das neue Kompaktkernbrennelement mit den gekrümmten Brennstoffplatten.



Ein Meilenstein auf der Baustelle – das Dach des Reaktorgebäudes ist geschlossen (1998).



Reaktorgebäude des FRM II und „Atom-Ei“ mit der dazwischen liegenden Neutronenleiterhalle (2001).

rechtliche Teilgenehmigung, die die übrigen Gebäude und die maschinen- und elektrotechnischen Einbauten umfasste. Nach 15 Monaten erteilte das bayerische Umweltministerium nach intensiven Beratungen diese 2. Teilgenehmigung, zwar mit 44 Auflagen, aber es konnte sofort weiter gebaut werden. Auch gegen diese gab es Klagen und die monatlichen so genannten Sonntagsspaziergänge der lokalen Reaktorgegner, die das Baustellengelände umrundeten. Die Baustelle stieß bei einem ersten Tag der offenen Tür jedoch auf sehr großes Interesse, denn es kamen fast 1000 Besucher. Im Sommer 1998 schließlich stand der Rohbau und wurde mit einem zünftigen Richtfest gefeiert.

Der Instrumentierungsausschuss der deutschen Neutronenwissenschaftler hatte schon 1997 eine Liste von 20 vordringlichen Messinstrumenten an der neuen Neutronenquelle festgelegt, die alle zumindest gleich gut und möglichst besser sein sollten als irgendwo sonst auf der Welt.

Verzögerung wegen Umrüstungsdebatte

Für die nukleare Inbetriebsetzung und den Routinebetrieb war allerdings eine dritte Teilgenehmigung erforderlich, mit der alle gegen Jahresende 2000 rechneten. Die Bundestagswahl 1998 endete aber mit einem Regierungswechsel und dem Ziel eines

Atomausstieg. Die neue Bundesregierung bemängelte insbesondere, dass der FRM II mit hoch angereichertem Uran (93% ^{235}U) betrieben werden sollte und wollte prüfen, ob ein Betrieb auch mit nieder angereichertem Uran (20% ^{235}U) möglich sei. Dazu setzte der neue Bundesumweltminister Jürgen Trittin eine Expertenkommission ein, die verschiedene Optionen prüfen sollte. Eine sofortige Umstellung auf niedrig angereichertes Uran hätte den Betrieb um mindestens 8 Jahre verzögert und enorme Umbaukosten von mehr als 300 Mio. DM nach sich gezogen. Nach langen Beratungen und Diskussionen fanden alle Beteiligten schließlich einen Kompromiss: der FRM II sollte die ersten 10 Jahre mit hoch angereichertem Uran betrieben und diese Frist sollte genutzt werden, um ein neues Brennelement mit niedriger angereichertem Uran zu entwickeln.

Diese Verzögerung blieb jedoch nicht die einzige: im Herbst 1998 urteilte der Bayerische Verwaltungsgerichtshof, dass ein Bürgerbegehren anders als nach Ansicht der Stadt Garching doch zulässig sei. Dieses fand kurz danach auch statt und endete äußerst knapp mit einem einjährigen Stopp für Änderungsanträge zur Baugenehmigung.

Im Sommer 2000 wurde das „Atom-Ei“ in einem feierlichen Akt endgültig abgeschaltet, aber es fehlte nach wie vor die 3. Teilgenehmigung für

den Betrieb des Nachfolgers. Die ersten beiden Brennelemente waren samt Transportbehälter in Frankreich gebaut worden, mussten aber deshalb weiterhin dort gelagert werden.

Endlich Betriebsbeginn

2001 schließlich war der Bau fertig, ein Vertrag über die Bedingungen für die 3. Teilgenehmigung geschlossen und eine neue Organisationsstruktur für den zukünftigen FRM II beschlossen. Dieser sollte von einem dreiteiligen Direktorium geleitet werden und als Zentrale Wissenschaftliche Einrichtung direkt dem Präsidenten der TUM unterstellt sein. Dennoch dauerte es noch gut zwei Jahre und etliche Iterationsschritte, bis die Betriebsgenehmigung im Mai 2003 unterschrieben vorlag. Der Hauptgrund für die Verzögerung war die nochmals vom Bund gewünschte Diskussion der Sicherheit des FRM II auch bei schweren auslegungsüberschreitenden Störfällen, aber auch dies konnte zufriedenstellend geklärt werden.

Nach der Anlieferung des ersten Brennelements und des schweren Wassers aus Frankreich konnte die Forschungs-Neutronenquelle angefahren werden. Am 2. März 2004 wurde der Reaktor das erste Mal „kritisch“, um ab dann die lange ersehnten Neutronen für Wissenschaft, Industrie und Medizin zur Verfügung stellen zu können.



„Glücklicherweise hat sich das Projekt FRM II seit seiner Gründung im Jahre 1979 äußerst erfolgreich entwickelt. Die Nachfrage aus Wissenschaft, Technik und Medizin ist beeindruckend und dementsprechend auch das Wachstum an Messinstrumenten und Experimentierflächen. Wenn der FRM II weiterhin auch von der Politik so unterstützt wird wie bisher – und davon darf ich ausgehen – dann können wir uns noch auf viele Jahrzehnte intensiver und erstklassiger Forschungsarbeiten am FRM II freuen.“

Prof. Dr. Klaus Böning,
Projektleiter in der Planungsphase des FRM II (1979-1995)

Prof. Dr. Wolfgang Schmahl, Ludwig-Maximilians-Universität München, amtierender Vorsitzender des Messzeit-Gutachterausschusses am FRM II

„Um in der Zukunft wissenschaftlich auch weiterhin erfolgreich zu sein, würde ich zu einer möglichst diversen, und damit adaptionsfähigen experimentellen Infrastruktur und Nutzungsstruktur raten. Hier steht der FRM II sehr gut da, weil er von Anfang an sehr divers geplant worden ist. Wenn man sich zu sehr auf wenige Themen oder Nutzungsmodelle spezialisieren würde, liefe man Gefahr, dass man kurzen Wogen hinterherläuft, die auch schnell wieder abebben und in eine statische Phase übergehen könnten.“



Dr. Anton Axmann, Gesamtprojektleiter FRM II 1995 bis 2002

„Ich bin damals von Berlin, wo ich die dortige Neutronenquelle BER II modernisiert hatte, nach München abgeworben worden. Für mich war es eine Herausforderung und ein Reiz, noch einmal etwas Neues aufzubauen. In Garching fand ich mich dann in einem Spannungsfeld zwischen genehmigenden Ministerien, vorantreibender Wissenschaft und realisierender Baufirma wieder. Allen gerecht zu werden – das war die Herausforderung, die mich reizte. Und es war mir eine Ehre in die Fußstapfen der namhaftesten deutschen Neutronenforscher zu treten.“

Prof. Dr. h.c. mult. Hans Zehetmair, Staatsminister a.D., Wissenschaftsminister 1986 bis 2003



„Ich verbinde mit dem FRM II die Erinnerung an einen langjährigen Diskussionskampf, der enorm ideologisch geprägt war und die wissenschaftliche Seite zu gering beachtete. Das Gebiet der Forschung auf dem Feld der Neutronen ist von eminenter Bedeutung für die Zukunft und die Entwicklung der modernen Gesellschaft und Zivilisation. Ich habe mich für den FRM II aus der Überzeugung eingesetzt, dass der Standort dafür in Bayern ein enormer Qualitätssprung auf dem Feld der Wissenschaft ist, weshalb nicht zuletzt aus Konkurrenzgründen aus den USA jedwede Querschüsse kamen, weil zu befürchten stand – und danach eintraf –, dass in der Neutronenforschung mit der Realisierung Deutschland, konkret Bayern die Nummer eins wird. Im Übrigen hat Helmut Kohl als Bundeskanzler mich bei einer Begegnung aus Anlass des 85jährigen Geburtstags von Heinz Maier-Leibnitz ermutigt, in dem kontroversen Streit nicht nachzulassen: „Entweder entsteht diese Neutronenquelle in Bayern oder nirgends in Deutschland“, so lautete sein Kommentar.“



Betrieb des FRM II von 2004 bis 2014

Technisch war der FRM II im Jahr 2001 fertig gestellt und es war geplant, unmittelbar nach der Phase der „kalten“ Inbetriebsetzung (IBS) der gesamten Anlagentechnik in die „heiße“ d.h. die nukleare Inbetriebsetzung überzugehen. In dem in drei Schritten angelegten atomrechtlichen Genehmigungsverfahren war nach der 1. Teilgenehmigung im April 1996, die im Wesentlichen die Errichtung baulicher Anlagen wie das Reaktorgebäude beinhaltete, nach der 2. Teilgenehmigung im Oktober 1997, die die gesamte Anlagentechnik umfasste, eine 3. Teilgenehmigung vorgesehen, die die nukleare Inbetriebsetzung und den darauf folgenden Betrieb des FRM II

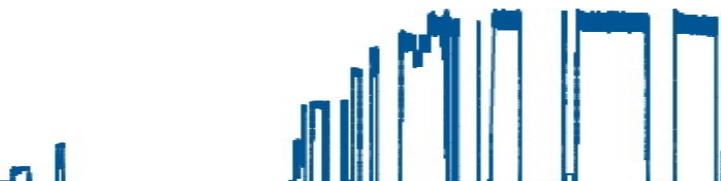
von der Bundesaufsicht aufgeworfene Fragestellungen und politische Abstimmungen zu strittigen Fragen bis in das Jahr 2003. In dieser Phase, die allen Beteiligten und am Betrieb des FRM II Interessierten neben großem Einsatz auch viel Durchhaltevermögen abverlangte, bezeichnete sich in dem im November 2002 in der „ZEIT“ erschienen Artikel „Durchbruch zum Stillstand“ der erste Technische Direktor des FRM II, Prof. Dr. Klaus Schreckenbach, noch als „Außer-Betriebsleiter“ einer technisch fertig gestellten Anlage, auf die eine große Zahl von Wissenschaftlern seit Jahren wartet. Einige Monate später, am 2. Mai 2003 konnte das Bayerische Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen als zuständige Genehmigungsbehörde die 3. Teilgenehmigung erteilen und die von MDgt Dr. Brandmair und MR Locke unterzeichnete Genehmigung wurde den beiden Genehmigungsinhabern, der Technischen Universität München und der Siemens AG, am 12.05.2003 offiziell überreicht. Für die Genehmigung war die sofortige Vollziehung angeordnet, die Vorbereitungen für die nukleare Inbetriebsetzung konnten somit umgehend beginnen.

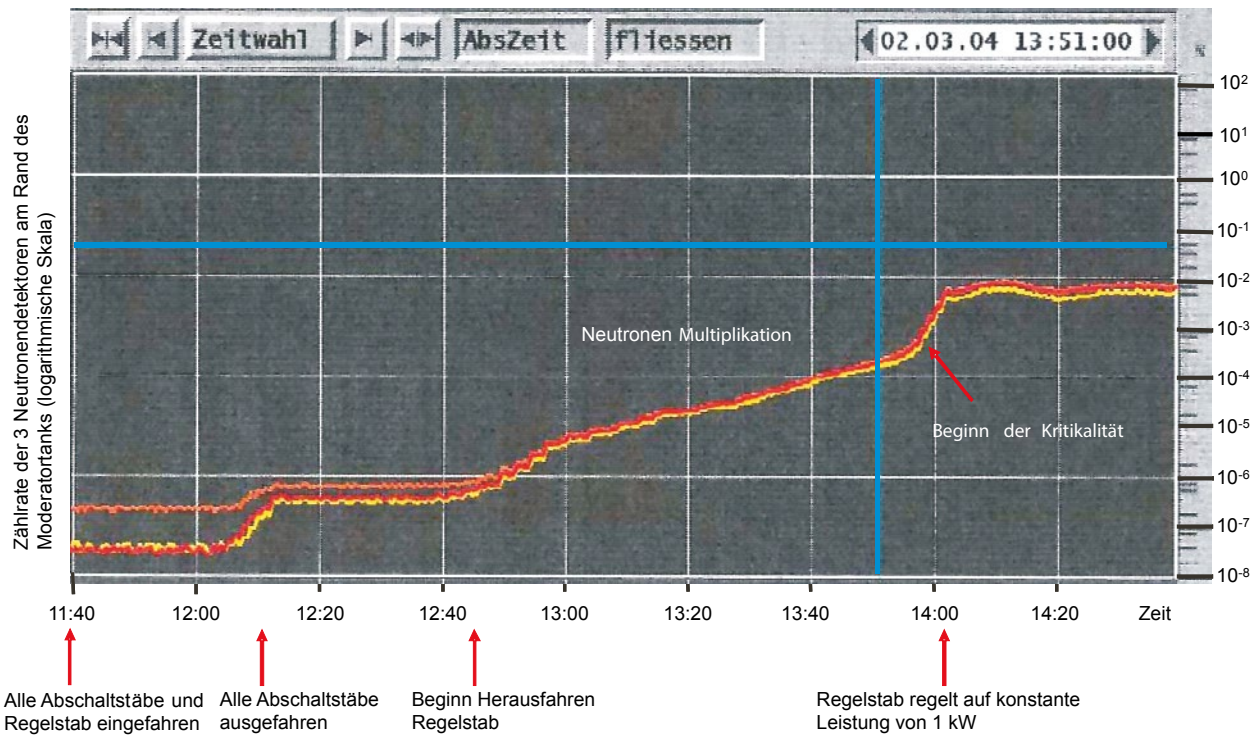


abdeckt. Die Erwartung, dass diese Genehmigung mit der technischen Fertigstellung der Anlage vorliegen würde, erfüllte sich nicht und das Verfahren verzögerte sich unter anderem durch immer neue

Vorbereitungen für die nukleare Inbetriebsetzung

Während der gesamten Zeit, in der auf die Erteilung der Betriebsgenehmigung gewartet wurde, hielt eine Betriebsmannschaft aus Mitarbeitern der TUM und Siemens alle technischen Anlagen betriebsbereit und führte die regelmäßig fälligen Wartungen und Prüfungen durch. Gleichzeitig hatte aus nachvollziehbaren Gründen Siemens nicht das ganze für die nukleare Inbetriebsetzung erforderliche Per-





Messung des Neutronenflusses während des ersten Anfahrens, erste Kritikalität um 14:01 Uhr.

sonal am Standort gehalten. Als die Genehmigung vorlag, wurde daher unmittelbar begonnen, das erforderliche Personal wieder zusammenzuziehen und den zeitlichen Ablauf der Inbetriebsetzung konkret festzulegen. Da es ohne Genehmigung auch nicht möglich war, das als Moderator notwendige schwere Wasser und die beim Hersteller in Frankreich gelagerten ersten Brennelemente anliefern zu lassen, wurde auch dies unmittelbar nach Erteilung der Genehmigung in Angriff genommen. Die insgesamt ca. 24 t hochreines schweres Wasser wurden in zwei Chargen in 105 speziellen Fässern am 5. Juni 2003 und 13. Juni 2003 von Cadarache

nach Garching geliefert. Bei der zweiten Lieferung stellten Mitarbeiter des Strahlenschutzes bei der Eingangskontrolle der Fässer noch vor dem Abladen an zwei Fässern eine kleine Undichtigkeit der Verschlüsse fest, die zum Austritt einiger Tropfen Schwerwasser geführt hatte. Dies führte zu einem breiten Echo in der Presse und vor allem bei den Gegnern des FRM II, die sofort einen „Zwischenfall“ am Reaktor noch vor der Inbetriebnahme unterstellten. Neben dem schweren Wasser musste auch die für die nukleare Inbetriebsetzung wichtigste Komponente, das erste echte Brennelement aus Frankreich nach Garching transportiert wer-

den. In einem stark gesicherten speziellen Transportfahrzeug kamen am 10. Juli 2003 die ersten beiden Brennelemente FRM II-004 und FRM II-005 in Garching an. Nach vielen weiteren vorbereitenden Arbeiten, Tests und Nachweisen stimmte die Aufsichtsbehörde mit Schreiben vom 19.02.2004 der Aufnahme der Nullleistungsprüfungen zu.

Die nukleare Inbetriebsetzung

Nach dem Vorliegen der Zustimmung zu den Nullleistungsprüfungen, die den Einbau des Brennelements und alle vor dem ersten Kritischmachen des Kerns vorgesehenen IBS-Schritte der sog. Phase F3 umfasste, konnte die „heiße“ Phase der nuklearen Inbetriebsetzung beginnen. Hierzu wurde am 24. Februar 2004 die erste Konverterplattenanordnung in die Strahlrohrkonverteranlage eingesetzt, der Einbau des ersten Brennelements FRM II-004 in die Betriebsposition im Zentralkanal war am 26. Februar 2004 abgeschlossen. Schon im November 2003 war in einer eigens dafür am FRM II vorhandenen Messeinrichtung nachgewiesen worden, dass die beiden gelieferten Brennelemente die spezifizierte Menge an spaltbarem Uran ²³⁵U enthalten. Im Anschluss an den Einbau des Brennelements, das Verschließen des Zentralkanals und der Inbetriebnahme des Primärkühlkreises konnte mit dem stufenweisen Einfüllen des als Moderator dienenden schweren Wassers begonnen werden. Da bei diesem Vorgang der Regelstab ganz ausgefahren und alle fünf Abschaltstäbe in ihrer unteren Endlage waren, wurde damit im Rahmen eines sog. kritischen Experiments auch der Nachweis geführt, dass die Abschaltstäbe den Reaktor alleine unterkritisch halten. Nach einem ähnlichen Nachweis für den Regelstab und der vorgese-



henen Messung der Fallzeiten des Regelstabs und der Abschaltstäbe war die Anlage für das erste Kritischfahren d.h. den erstmaligen Beginn einer sich selbst erhaltenden Kettenreaktion von Kernspaltungen bereit. Am 1. März 2004 stimmte das Bayerische Staatsministerium für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz (StMUGV) dem IBS-Schritt F3-2.6 „Kritischmachen des Kerns“ zu und am Folgetag, dem 2. März 2004 wurde dieser durchgeführt. Nach dem Ausfahren aller Abschaltstäbe und dem schrittweisen Ausfahren des Regelstabes wurde der FRM II um 14:01 Uhr bei einer Regelstabstellung von 340,72 mm erstmalig kritisch. Diese Regelstabstellung war in nahezu perfekter Übereinstimmung mit den zuvor berechneten Werten und bestätigte eindrucksvoll die Qualität der verwendeten Rechenmodelle. Nach dem gelungenen Betriebsbeginn des FRM II folgten zunächst vielfältige weitere Prüfungen mit wiederholtem An-

und Abfahren des Reaktors bei kleinen Leistungen. Schon während dieser Zeit konnten die ersten Neutronen an einigen schon fertig gestellten Instrumenten genutzt werden, und es verging keine Woche ohne begeisterte Erfolgsmeldungen der nun endlich an einer echten Neutronenquelle arbeitenden Kollegen aus dem Bereich Wissenschaft. Nach dem Abschluss der Prüfungen bei kleiner Leistung am 12. April 2004 stimmte das StMUGV am 19. April der Aufnahme der Leistungsprüfungen zu. Diese wurden am folgenden Tag begonnen und nach einer großen Zahl von Prüfungen und Nachweisen bei verschiedenen Leistungsstufen erreichte der FRM II am 24. August 2004 erstmalig seine Nennleistung von 20 MW. Von den 52 gemäß Genehmigung erlaubten Volllasttagen eines Brennelements wurden für die Inbetriebsetzungsschritte nur 24 benötigt. Es standen somit noch 28 Volllasttage für einen Betrieb bei 20 MW zur Verfügung. Der FRM II wurde daher nach entspre-



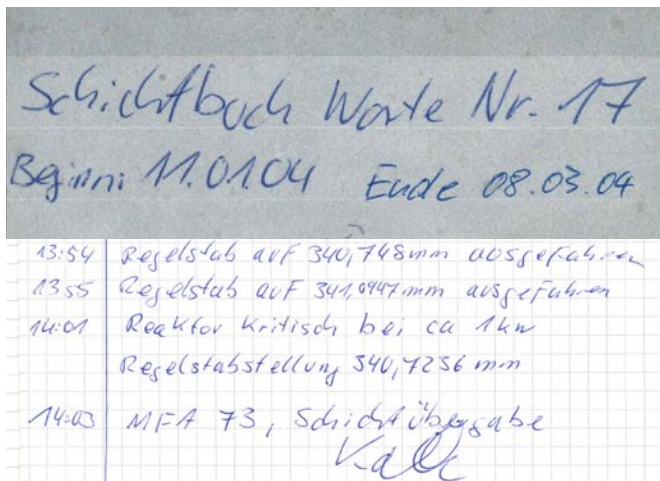
Cherenkov-Licht beim Ausbau des abgebrannten Brennelements.

chender Zustimmung durch das StMUGV noch bis zum 21. Oktober mit dem ersten Brennelement betrieben und lieferte so schon in der zweiten Hälfte seines Inbetriebsetzungszyklus Neutronen für die wissenschaftlichen Instrumente bei Nennleistung, was eine baldige Aufnahme des Routinebetriebs erwarten ließ.

Aufnahme des Routinebetriebs

Nach der erfolgreichen Inbetriebsetzung des FRM II waren die aus dieser Phase gewonnenen Erkenntnisse gründlich auszuwerten, die Ergebnisse technisch und administrativ umzusetzen und nicht zuletzt umfangreiche Ergebnisberichte der Aufsichtsbehörde und den beteiligten Sachverständigen vorzulegen.

Am 22. April 2005 erklärte die Siemens AG schriftlich die Abnahmebereitschaft der Anlage, das StMUGV stimmte dem Ausscheiden der Siemens AG als Mitgenehmigungsinhaberin des FRM II zu, die TUM übernahm die alleinige verantwortliche Betriebsführung und erhielt mit gleichem Datum

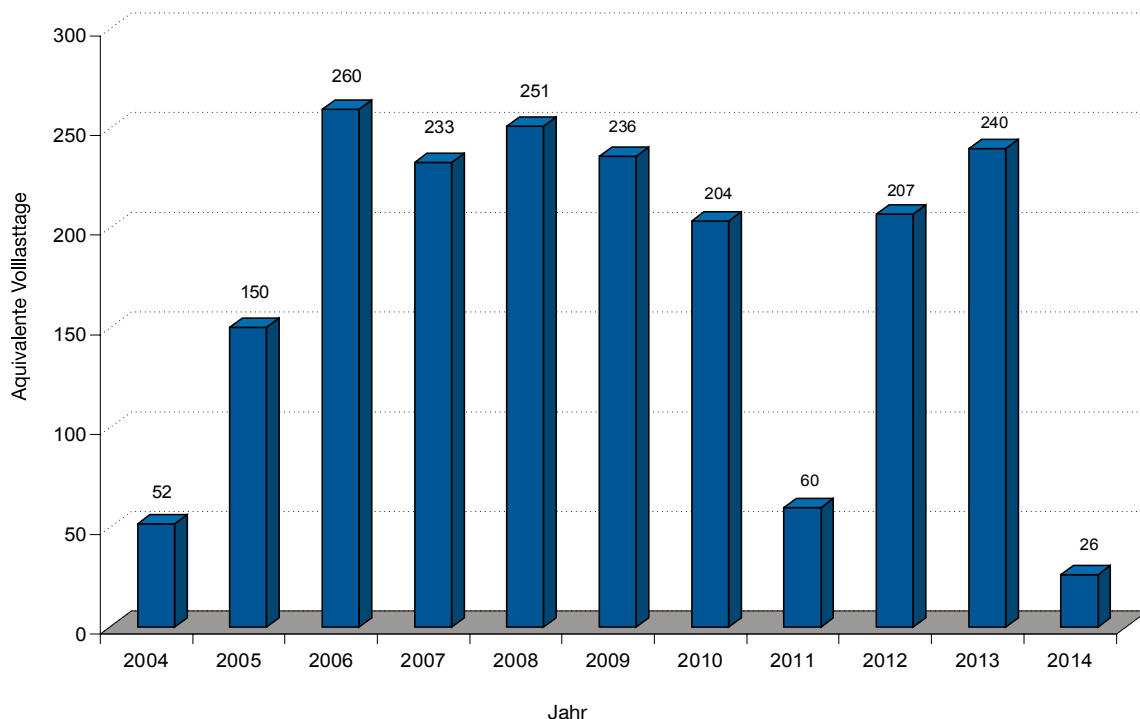


Auszug aus dem Schichtbuch vom 2. März 2004 - 14.01 Uhr der Reaktor ist kritisch.

die Zustimmung zum Routinebetrieb. Wenige Tage später, am 29. April 2005, begann dann mit dem 2. Reaktorzyklus der Routinebetrieb des FRM II. Schon im ersten Jahr des Routinebetriebs konnten bis zum Jahresende drei Reaktorzyklen mit insgesamt 150 Volllasttagen den Nutzern aus Wissenschaft und Industrie zur Verfügung gestellt werden. Zum Ende des Jahres 2005 übergab Prof. Dr. Klaus Schreckenbach, der mit seiner großen Erfahrung die Genehmigungs- und Inbetriebsetzungsphase seitens der TUM geleitet und zum Erfolg geführt hatte, die technische Leitung der Anlage an Dr. Ingo Neuhaus, der ab dem 1. Januar 2006 als Technischer Direktor die Verantwortung für den sicheren und zuverlässigen Betrieb des FRM II übernahm.

Das erste volle Betriebsjahr und ein Rekord

Für das Jahr 2006 hatte man sich bei der Betriebsplanung das durchaus ehrgeizige Ziel gesetzt, den FRM II in fünf Betriebszyklen zu je 52 Tagen zu betreiben. Hierzu wurde direkt zu Jahresanfang am 4. Januar mit dem 5. Zyklus begonnen. Mit den folgenden Zyklen Nr. 6, 7, 8 und 9 wurden bis zum 18. Dezember 2006 insgesamt 260 Betriebstage bei Nennleistung erreicht. Dies stellte bereits im ersten vollen Betriebsjahr des FRM II einen Weltrekord bzgl. der verfügbaren Betriebstage vergleichbarer Hochflussneutronenquellen dar und übertraf den in den 1980er Jahren aufgestellten Rekord des Institute Laue-Langevin in Grenoble um 8 Tage.



Betriebstage des FRM II vom 02.03.2004 bis zum 02.03.2014.





Baustelle des neuen Gebäudes östlich des Reaktorgebäudes als erste große Erweiterung des FRM II.

Nachdem im Jahr 2006 der Forschungsreaktor FRJ-2 in Jülich abgeschaltet wurde, sollten einige Instrumente von dort nach Garching zum FRM II verbracht werden und eine Außenstelle des Forschungszentrums entstehen. Mit dem dafür vorgesehenen Gebäude östlich des Reaktorgebäudes begannen bereits 2006 die ersten Baumaßnahmen zur Erweiterung des FRM II. Inzwischen ist das Gebäude in den nach § 7 AtG genehmigten Anlagenumfang des FRM II eingegliedert und durch eine Zwischenstruktur baulich an das Reaktorgebäude angebunden.

Die Tumorthherapie beginnt

Die schon am FRM (alt) durchgeführte Therapie oberflächennaher Tumore mit schnellen Spaltneu-

tronen sollte auch am FRM II unter deutlich verbesserten Randbedingungen fortgeführt werden. Gerade die Möglichkeit zur medizinischen Nutzung war ein wichtiges Argument für den FRM II in der langjährigen öffentlichen Diskussion über die Notwendigkeit einer neuen Neutronenquelle. Daher wurde auch am FRM II eine sog. Strahlrohrkonverteranlage zur Erzeugung schneller Spaltneutronen installiert und auch mit dem Reaktor genehmigt. In der Betriebsgenehmigung war aber auch festgelegt, dass die Nutzung der Neutronenstrahlen in der Heilkunde einer getrennten Genehmigung bedarf. Voraussetzung für eine solche Genehmigung ist, dass die eingesetzte Anlage zur Erzeugung ionisierender Strahlung eine Baumusterprüfbescheinigung nach der europäischen Medizingerätrichtlinie bzw. dem Medizinproduktegesetz hat und der Hersteller auf dieser Grundlage eine Konformitätserklärung ausstellen kann. Das seit 1999 laufende Konformitätsbewertungsverfahren wurde ab Juli 2005 wieder aktiv betrieben und der medizinisch genutzte Teil der Strahlrohrkonverteranlage sowohl technisch als auch hinsichtlich der umfangreichen Dokumentation auf einen Stand gebracht, der eine Baumusterprüfung zuließ. Am 2. August 2006 fertigte die benannte Stelle die EG-Baumusterprüfbescheinigung aus und am 20. November konnten der Kanzler der TUM und die Mitglieder des Direktoriums der ZWE-FRM II die Konformitätserklärung unterzeichnen. Nachdem nun die wesentliche Voraussetzung für eine Genehmigung gegeben war, erteilte das Landesamt für Umwelt am 12. Februar 2007 die Genehmigung für die medizinische Nutzung der Strahlrohrkonverteranlage. Die Tumorthherapie am FRM II konnte beginnen, die TUM hatte auch in diesem Punkt „Wort gehalten“.

Zyklusverlängerung auf 60 Tage

Schon zum Ende des ersten Reaktorzyklus wurde erkennbar, dass die Berechnungen des Brennelements auch hinsichtlich der möglichen Zykluslänge konservativ waren und die nach 52 Tagen verbleibende Überschussreaktivität des Kerns eine längere Verwendung des Brennelements erlauben würde. Auch waren die Bestrahlungstests und Sicherheitsnachweise für die im Brennelement enthaltenen Brennstoffplatten und den verwendeten Uransilizid-Dispersionbrennstoff abdeckend für einen höheren Abbrand des Brennelements. Daher wurde im Juli 2007 bei der Aufsichtsbehörde beantragt, den zulässigen Abbrand des Brennelements von 1040 MWd auf 1200 MWd zu erhöhen und damit eine Zykluslänge von 60 Tagen zu ermöglichen. Nach Prüfung durch die Behörde und die beteiligten Sachverständigen der Behörde wurde die entsprechende Zustimmung erteilt und schon das Brennelement des 14. Reaktorzyklus konnte über die bisher erlaubten 1040 MWd hinaus genutzt werden. Im ersten Zyklus des Jahres 2008 wurde dann erstmalig ein Brennelement bis zu einem Abbrand von 1200 MWd betrieben. Seitdem beträgt die normale Zyklusdauer des FRM II 60 Tage, wobei in normalen Betriebsjahren vier solche Vollzyklen mit dann insgesamt 240 Betriebstagen vorgesehen sind. Damit wird das Brennelement bzw. der Brennstoff effizienter genutzt und auch unter den Aspekten der Wirtschaftlichkeit und Entsorgung ist die verlängerte Zyklusdauer in Verbindung mit vier statt fünf Zyklen pro Jahr von Vorteil.

Ein zukunftsweisendes Projekt – die Produktionsanlage für ^{99m}Tc

Neben der wissenschaftlichen Nutzung leisten Forschungsreaktoren weltweit auch einen wesentlichen Beitrag bei der Erzeugung wichtiger Radioisotope für die Nuklearmedizin. Das dabei am häufigsten genutzte Nuklid ist ^{99m}Tc , das aus dem Spaltprodukt ^{99}Mo entsteht. Die mit geeigneten Produktionseinrichtungen ausgerüsteten Reaktoren sind größtenteils schon viele Jahrzehnte in Betrieb und es ist absehbar, dass durch den ungeplanten Ausfall oder die geplante Abschaltung dieser Reaktoren eine weltweite Verknappung dieses Isotops eintreten wird. Da einige Jahre vor der Abschaltung im Jahr 2006 auch am Forschungsreaktor FRJ-2 in Jülich eine solche Produktionsanlage installiert worden war, war es Dr. Ingo Neuhaus, der vor seinem Wechsel nach Garching Betriebsleiter des FRJ-2 war, ein besonderes Anliegen, auch den FRM II für die Produktion von ^{99}Mo auszurüsten. So wurde 2009 eine umfangreiche Machbarkeitsstudie ausgearbeitet und auf dieser Grundlage mit dem Projekt zur Entwicklung und zum Einbau einer entsprechenden Anlage in den FRM II begonnen. Dieses wichtige Projekt wird auch nach dem Wechsel von Dr. Neuhaus in die Industrie Ende März 2010 konsequent weiterverfolgt, um mit dem FRM II als noch junge Anlage die zukünftige Versorgung Europas mit ^{99}Mo sicherzustellen.

Der erste Austausch eines Strahlrohres

Für das Jahr 2010 wurden statt der 240 Betriebstage eines normalen Betriebsjahres nur etwas über 200 Betriebstage eingeplant, da erstmalig ein





IAEA-Generaldirektor Yukiya Amano (links) mit Dr. Anton Kastenmüller (Mitte) und Wissenschaftsminister Dr. Wolfgang Heubisch (rechts) am Reaktorbecken des FRM II.

Strahlrohr ausgetauscht werden sollte. Erforderlich wurde das für das schräge Strahlrohr SR11 der Positronenquelle, weil das in der Nase des Strahlrohrs eingebaute und für die Erzeugung der Positronen notwendige Cadmium-Isotop durch Neutroneneinfang aufgebraucht war. Gleichzeitig wurden mit dem Austausch des Strahlrohrs auch die darin befindlichen Einbauten der Positronenquelle ersetzt. Da für den Wechsel eines Strahlrohrs der das schwere Wasser enthaltende Moderator tank entleert und getrocknet werden muss, wurde diese Gelegenheit zugleich genutzt, als ersten Schritt für die ^{99}Mo -Produktionsanlage ein geeignetes Bestrahlungsrohr in den Moderator tank einzubauen.

Noch vor der Abschaltung zur geplanten größeren Wartungspause wurde dem FRM II eine besondere Ehre zuteil: Der Mitte 2009 zum Generaldirektor der Internationalen Atomenergieorganisation (IAEA) ge-

wählte Yukiya Amano besuchte auf Einladung der Bundesregierung am 8. Oktober 2010 den FRM II und informierte sich vor Ort über die Sicherheitsmerkmale und die vielfältigen Nutzungsmöglichkeiten unserer modernen Neutronenquelle.

Fukushima und die Folgen für den FRM II

Als das verheerende Erdbeben und der folgende Tsunami am 11. März 2011 einen Küstenstreifen vor Sendai in Japan verwüstete und in dessen Folge der Unfall in den Kernkraftwerken in Fukushima Daiichi immer größere Ausmaße annahm, war der FRM II wegen der umfangreichen Maßnahmen des Strahlrohrtauschs des SR11 noch außer Betrieb. In dieser Zeit war das Informationsbedürfnis der Öffentlichkeit zu Fragen der Kerntechnik und Sicherheit derartiger Anlagen verständlicherweise besonders groß. Der FRM II, der eben kein Kern-

kraftwerk, sondern eine von einer Universität betriebene Forschungseinrichtung ist, leistete durch eine große Zahl von Informationsveranstaltungen seinen Beitrag zur sachlichen und fundierten Information vieler interessierter Bürger. Aufgrund der Ereignisse in Japan begannen weltweit Aufsichtsbehörden umfangreiche Sicherheitsüberprüfungen zuerst in Kernkraftwerken und kurz danach auch in Forschungsreaktoren durchzuführen. Auch der FRM II wurde mehreren Sicherheitsüberprüfungen, u.a. veranlasst durch die bayerische Aufsichtsbehörde und die Reaktorsicherheitskommission des Bundesumweltministeriums, unterzogen. Da den Sicherheitsüberprüfungen durch die Betreiber, die Behörden und die zugezogenen Sachverständigen Vorrang eingeräumt wurde, verzögerte sich der Abschluss verschiedener technischer Maßnahmen und damit das Wiederanfahren des FRM II bis zum 3. Oktober 2011 und es konnte im Jahr 2011 nur ein Vollzyklus zu 60 Betriebstagen bereitgestellt werden.

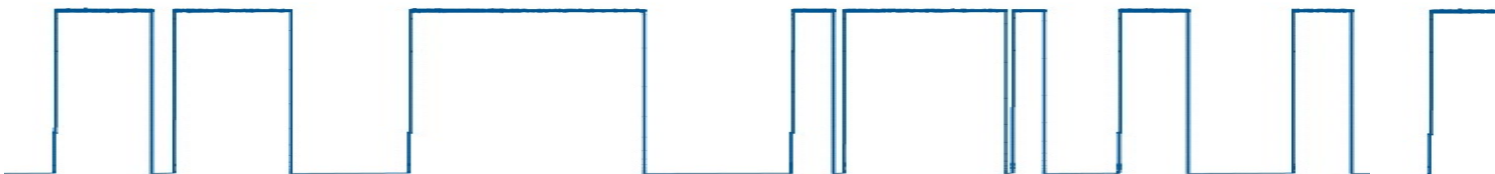
Das 10. Betriebsjahr – 100% Verfügbarkeit

Auch im zehnten Jahr seines Betriebs, dem Jahr 2013, stellte der FRM II seinen Nutzern die maximal vorgesehenen 240 Betriebstage in vier Vollzyklen zur Verfügung und war damit zu 100 % verfügbar. Durch die Zusammenführung der Instrumente der TUM mit den Instrumenten des Forschungszentrums Jülich und der Helmholtz-Zentren Geesthacht und Berlin unter dem Dach des neu gegründeten Heinz Maier-Leibnitz-Zentrums (MLZ) setzt sich

das Wachstum und die Internationalisierung der Nutzergemeinde weiter fort. Auch der FRM II selbst wird kontinuierlich weiterentwickelt. So wurde der Lastenaufzug im Reaktorgebäude mit großem Aufwand auf eine Traglast von 10 t ertüchtigt und als zusätzliche Sicherheitseinrichtung eine weitere Hauptrückschlagklappe in das Primärkühlsystem eingebaut. Dies gilt nicht nur für betriebliche Einrichtungen, auch die wissenschaftliche Instrumentierung wird laufend umgebaut, modernisiert und ergänzt. Das damit auch verbundene personelle Wachstum im Bereich des Eigenpersonals der TUM und unserer Kooperationspartner erfordert zunehmend mehr Raum, den es in den nächsten Jahren durch schon begonnene Baumaßnahmen auf dem Gelände des FRM II zu schaffen gilt.

Große wiederkehrende Prüfungen stehen an

Der FRM II wurde am 2. März 2004 erstmalig kritisch. Dieser Tag jährte sich Anfang März 2014 zum zehnten Mal. Dies ist natürlich ein Grund zum Feiern - gerade weil der FRM II auf 10 Jahre erfolgreichen Betrieb zurückblicken kann. Mit dem Zeitraum von 10 Betriebsjahren sind in der Kerntechnik nach dem deutschen Regelwerk aber auch umfangreiche wiederkehrende Prüfungen (WKP) des Reaktors und seiner Systeme verbunden, deren Stichtag der 2. März 2014 ist. Daher wurde der FRM II im Jahr 2014 mit einem Teilzyklus von Jahresanfang bis zum 9. Februar betrieben und ging dann in eine geplante größere Wartungspause zur Durchführung aufwendiger Prüfungen.



Reaktorzyklen	34
Betriebstage	1919
Geleistete Nukleare Arbeit	38390 MWd
Durchgeführten WKP	17758
Zahl der Bestrahlungsaufträge	5673
Dotiertes Silizium	71,3 t
Zahl der Besucher	27851

Zehn Jahre FRM II von der IBS bis zu großen WKP bedeuten auch 10 Jahre wahrgenommene Verantwortung für den sicheren und zuverlässigen Betrieb der Neutronenquelle. Die TUM blickt beginnend mit dem „Atom-Ei“ seit 1957 auf viele Jahrzehnte Erfahrung im Betrieb von Forschungsreaktoren zurück, verfügt mit dem FRM II seit 10 Jahren über die leistungsfähigste Neutronenquelle in Deutschland und wird diese noch für viele Jahre im Dienste unserer Gesellschaft für Wissenschaft, Forschung, Industrie und Medizin betreiben.

10 Jahre Betrieb des FRM II in Zahlen.



Dr. Anton Kastenmüller,
Technischer Direktor

„Auf dem Campus der TUM in Garching befindet sich mit dem FRM, der als „Atom-Ei“ bekannt ist, nicht nur der erste Kernreaktor des wiedervereinigten Deutschlands, sondern mit dem 2004 in Betrieb gegangenen FRM II auch die neueste, modernste und vermutlich die letzte in Deutschland gebaute Reaktoranlage. Das mit der Entscheidung zum „Atomausstieg“ verbundene Auslaufen der Nutzung der Kernenergie zum Ende des Jahres 2022 bedeutet aber nicht, dass ein Hochtechnologie-Land wie Deutschland zukünftig keine Kompetenz mehr im Bereich der Kerntechnik haben müsste. Nicht nur der anstehende Rückbau der Kernkraftwerke sondern auch viele andere Gebiete wie die Nuklearmedizin und die Werkstoffprüfung sind langfristig auf „Know-How“ und hochqualifizierte Fachleute im Bereich der Kerntechnik angewiesen. Schon heute ist die Sorge um den „Kompetenzerhalt“ in diesem Fachgebiet daher Thema von Gesprächsrunden und Fachtagungen.

Mit dem langfristigen Betrieb des FRM II und der ständigen Weiterentwicklung seiner Anwendungsmöglichkeiten in Forschung und industrieller Nutzung trägt die TUM ganz entscheidend dazu bei, dass wir diese Kompetenz in Deutschland erhalten, einen Beitrag zur Versorgung Europas mit medizinisch wichtigen Radionukliden leisten und im Nuklearbereich von unseren europäischen Nachbarn, die die Kernenergie weiter nutzen und teilweise sogar ausbauen wollen, auch zukünftig anerkannt werden.“

Ministerialdirektor Dr. Adalbert Weiß, Amtschef im Bayerischen Staatsministerium für Bildung und Kultus, Wissenschaft und Kunst seit 2011

„In den ersten zehn Jahren seines Bestehens hat sich der FRM II einen beeindruckenden Ruf als wissenschaftliches Großgerät der Spitzenklasse erworben. Sein Erfolgsgeheimnis: Die außergewöhnliche Qualität seines Neutronenflusses, die mit den weltweit besten Einrichtungen konkurrieren kann, eine innovative Instrumentierung, die ihresgleichen sucht – und starke Partner in Universitäten und außeruniversitären Einrichtungen. Doch kann dies nur eine – wenn auch erfreuliche – Zwischenbilanz sein. Wissenschaft darf niemals selbstzufrieden, niemals statisch werden – auch am FRM II muss es um stete Weiterentwicklung und Verbesserung gehen, etwa in der Instrumentierung, der Definition neuer Forschungsgebiete und der Gewinnung des besten wissenschaftlichen Nachwuchses. Wenn es gelingt, den eingeschlagenen Weg konsequent weiter zu beschreiten, wird der FRM II in den nächsten zehn Jahren einen ganz wesentlichen Beitrag zu den großen Zukunftsthemen unserer Zeit leisten – Energieforschung, Informationstechnologie und Gesundheit, um nur die wichtigsten zu nennen.“



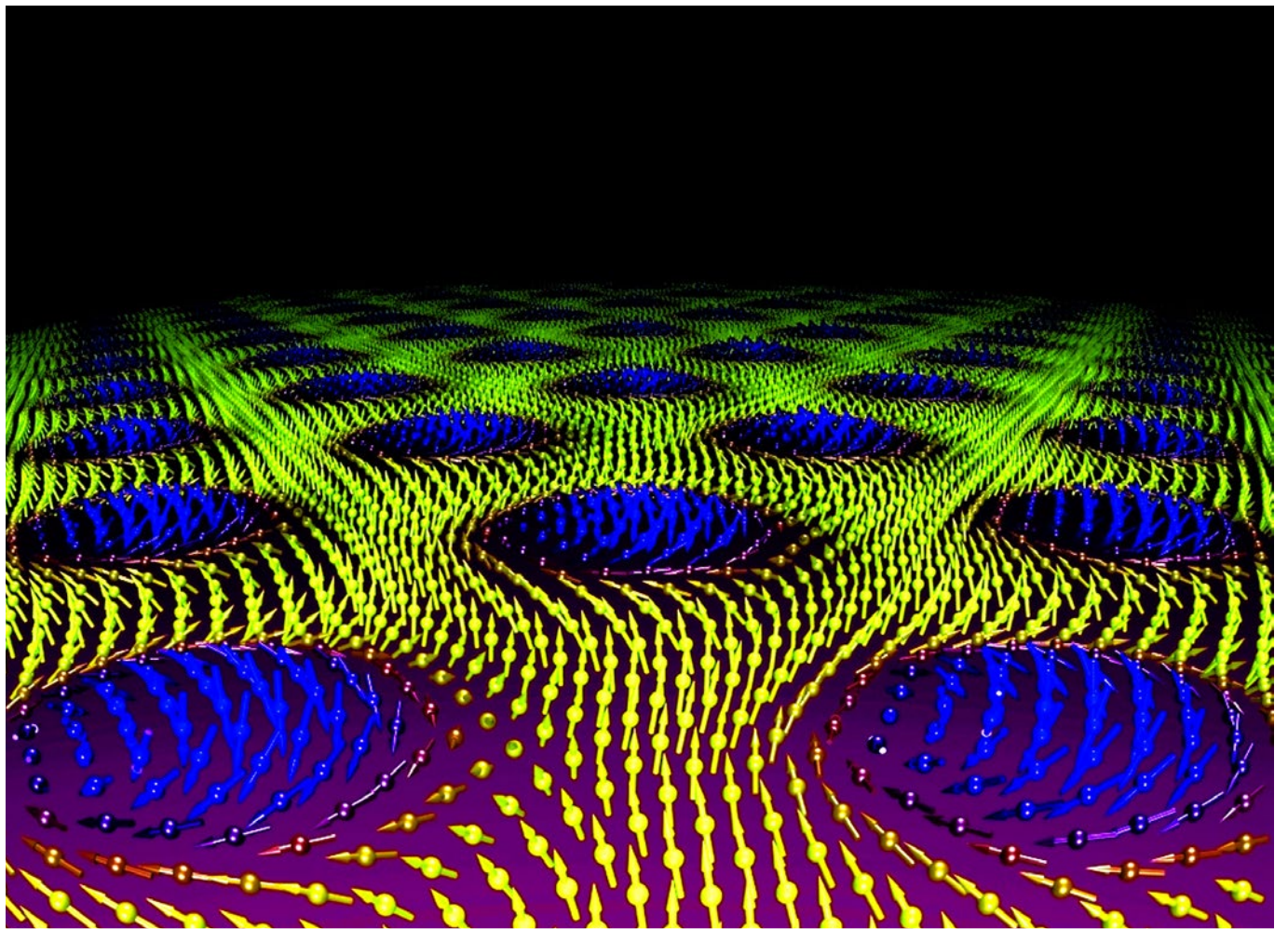
**Prof. Dr.-Ing. Otto Meitinger,
Präsident der Technischen Universität München 1987 bis 1995**

„Schon die erste Forschungsneutronenquelle in Garching hatte sehr zum Ansehen unserer Hochschule beigetragen. Noch im vergangenen Jahrhundert hat sich aber gezeigt, dass nur ein leistungsfähigerer FRM weiterhin wissenschaftliche Spitzenforschung ermöglicht. Als amtierender Präsident der TU habe ich deshalb den Bau des FRM II von Anfang an unterstützt, was dann letztlich nach Überwindung vieler finanzieller und politischer Schwierigkeiten zur Unterzeichnung des millionenschweren Generalunternehmervertrages führte.“



Dr. Edmund Stoiber, Bayerischer Ministerpräsident 1993 bis 2007

„Wenn Bayern ein Premium-Land sein soll, dann muss man dafür auch etwas tun. Die enormen wissenschaftlichen und ökonomischen Chancen einer Super-Neutronenquelle haben mich damals überzeugt und fasziniert. Die Durchsetzung war ein politischer Kraftakt: Vom intensiven Dialog mit besorgten Bürgern über die Querschüsse aus der rot-grünen Bundesregierung bis zur Beschaffung des notwendigen Urans mit Hilfe des französischen Staatspräsidenten Jacques Chirac. Und nicht zuletzt hat Bayern die Finanzierung praktisch im Alleingang gestemmt. Umso mehr freue ich mich, dass der FRM II heute Wissenschaftler aus aller Welt auf den Campus nach Garching zieht und wie ein Magnet auf Unternehmen in zukunftsorientierten Technologiefeldern wirkt.“



Neutronen für die Wissenschaft

Von der Inbetriebnahme, d.h. der ersten Kritikalität der Neutronenquelle im Jahr 2004, bis zu einem reibungslos laufenden Wissenschaftsbetrieb war es ein langer Weg. Die Überlegungen zur Nutzung begannen jedoch schon viel früher. Sie basierten auf den Erfahrungen der Nutzung des Atom-Eis einerseits und dem Vorbild eines sehr erfolgreichen Betriebs einer modernen Hochflussneutronenquelle wie beispielsweise dem Institut Laue-Langevin in Grenoble andererseits. Schnell wurde jedoch klar, dass ein solches Projekt von den damaligen Wissenschaftlern am FRM nicht alleine zu bewerkstelligen war. Die Instrumentierung des FRM II sollte auf der großen Expertise der deutschen Neutronenstreuer aufbauen. Ziel war es hierbei nicht nur den aktuellen und zukünftigen Bedarf an Neutronenstreuerapparaturen festzulegen, sondern die führenden Institute aus Deutschland mit der Konzeption, dem Bau als auch dem Betrieb der Instrumente in den FRM II einzubinden.

Instrumente früh geplant

Bereits vor dem ersten Spatenstich am 1. August 1996 traf sich der Instrumentierungsausschuss als Unterausschuss des wissenschaftlichen Beirats (Vorsitzender Prof. Dr. Tasso Springer, FZ-Jülich) am 22.3.1996 zur konstituierenden Sitzung in München. Den Vorsitz des Instrumentierungsausschusses übernahm Prof. Dr. Gernot Heger (RWTH Aachen). Darauf folgend wurde eine Liste zum Bau von 21 Instrumenten sowie Vorarbeiten zu zwei neuartigen Quellen (ultrakalte Neutronen und Spaltfragmente) im Juni 1997 ausgeschrieben. Nach detaillierter Diskussion im Instrumentierungsausschuss wurden die ersten 14 Instrumente im November 1997 zur Realisierung empfohlen. Die Finanzierung von zehn Instrumenten kam hierbei aus dem Bauetat des FRM II, vier Instrumente wurden von der Verbundforschung des BMBF finanziert. Bereits im Januar des darauffolgenden Jahres or-



Blick auf die ersten Instrumente in der Experimentierhalle (Ende 2002).

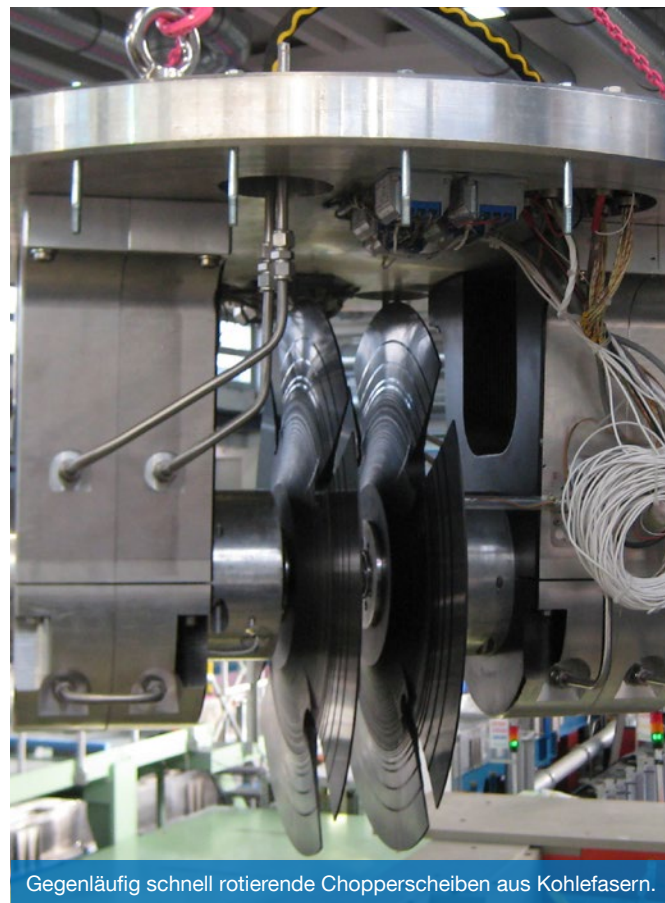
ganisierte der FRM II das erste Arbeitstreffen zur Instrumentierung, zu dem sich die beteiligten Gruppen von nun an im halbjährlichen Rhythmus trafen. Die Gruppen von deutschen Universitäten und Instituten der Helmholtz-Zentren in Jülich, Geesthacht und Berlin sowie der Max-Planck-Gesellschaft leisteten beim Aufbau der Instrumente einen erheblichen Eigenanteil, sei es an personellen oder finanziellen Anteilen an den Herstellungskosten. Mit einem für heutige Verhältnisse unvorstellbar niedrigen Budget von im Mittel entsprechend 1-2 Millionen Euro pro Instrument wurden innerhalb von 4 Jahren die ersten Instrumente in einer Grundausstattung aufgebaut. Bereits zur Internationalen Neutronenstreukonferenz, die der FRM II im September 2001 in München veranstaltete, konnten die ersten im Bau befindlichen Instrumente gezeigt werden.

Erste Mitarbeiter für Zentrale Servicegruppen

Parallel zu den Instrumentierungsgruppen, die sich in der ersten Zeit der Aufbauphase noch alle an ihren Heimatinstitutionen befanden, wurden am FRM II die zentralen Servicegruppen aufgebaut. Diese sollten die notwendige Infrastruktur für den Aufbau und späteren Betrieb der Instrumente leisten. Ab etwa Mitte 2000 wurden die ersten Mitarbeiter in den Gruppen Instrumentsteuerung, IT-Service,



Neu entwickelte Luftlager am Dreiachsenspektrometer PUMA.



Gegenläufig schnell rotierende Chopperscheiben aus Kohlefasern.

Probenumgebung sowie Detektoren und Elektronik eingestellt. Die Gruppe Neutronenoptik unter der damaligen Leitung von Herrn Dr. Erich Steichele begann mit der Konzeption der Strahlführung und der Auslegung der Neutronenleiteranlage bereits einige Jahre zuvor, da dies in den Bau der Strahlrohre und Strahlverschlüsse eingehen musste. Die Koordinierung der Instrumentierung, sowie der Aufbau der zentralen Gruppen wurde seit 1998 von mir geleitet.

Sowohl beim Bau der Instrumente als auch bei den zentralen Gruppen musste oft technologisches Neuland betreten werden. Bekannt von anderen Neutronenzentren und auch schon in einer einfa-



Instrumente in der Neutronenleiterhalle im Jahr 2013.



Einweihung der Neutronenleiterhalle-Ost mit Prof. Dr. Winfried Petry, MR Dr. Rainer Koepke (BMBF), Garchings Bürgermeister Manfred Solbrig und TUM-Präsident Prof. Dr. Dr. h.c. mult. Wolfgang A. Herrmann (v.l.).

chen Version am Atom-Ei eingesetzt war die Technik der Luftlager, um relativ schwere und komplexe Bauteile der Instrumente hochgenau zu positionieren. Für den FRM II wurden hierfür die verwendeten Materialien und die Komponenten weiterentwickelt. So wurde der an anderen Instituten oft verwendete Marmor für die ebenen „Tanzböden“ durch einen Naturstein aus Gabro ersetzt, der sowohl bessere mechanische als auch chemische Eigenschaften hat. Zudem wurde die Technik der Luftlager mit Unterstützung des damaligen Instituts für Feinmechanik, Fakultät für Maschinenwesen der TUM, optimiert.

Ein weiteres Beispiel für eine Neuentwicklung, die ebenfalls in Zusammenarbeit mit der Fakultät für Maschinenwesen der TUM, Lehrstuhl für Leichtbau, durchgeführt wurde, sind schnell rotierende Chopperscheiben aus Kohlefaserverbundwerkstoff. Bei einem Durchmesser von 600 mm und Umdrehungsfrequenzen von über 25 000 U/min bestehen sie Umfangsgeschwindigkeiten jenseits der doppelten Schallgeschwindigkeit.

Nach Abschluss der Inbetriebnahmephase und erfolgreichem Betrieb unter Volllast im Herbst 2004 wurde im November 2004 die erste Ausschreibung

für die Vergabe von Messzeiten durchgeführt. Die Gutachter trafen sich zu einer ersten Runde am 26. November 2004. Thematisch in zwei Gruppen aufgeteilt wurden die ersten 119 Messzeitanträge (Proposals) begutachtet und 668 Messzeittage zum Beginn des Routinebetriebs im Jahr 2005 vergeben. Obwohl die ersten Neutronen schon im Inbetriebnahmezyklus im Jahr 2004 genutzt werden konnten, standen die eigentliche Inbetriebnahme, Kalibrierung und Tests mit Neutronen im Jahr 2005 im Vordergrund. Hierbei halfen wesentlich unsere ersten externen Nutzer, die anhand der durchgeführten Experimente die Instrumente auf Herz und Nieren prüfen konnten und so zur Optimierung und Inbetriebnahme beigetragen haben.

Eigenes Büro managt Messzeiten

Mit steigender Anzahl der Experimente und zunehmender Nachfrage unserer externen Nutzer wurde im Jahr 2007 ein eigenes Nutzerbüro eingerichtet, das sämtliche Belange der externen Wissenschaftler von der Einreichung der Messzeitanträge bis zur Berichterstattung über das durchgeführte Experiment betreut. Heute organisiert das Nutzerbüro des



Prof. Dr. Dieter Richter (l.) und Prof. Dr. Winfried Petry bei der Gründungsfeier zum Heinz Maier-Leibnitz Zentrum.

MLZ im halbjährlichen Rhythmus Begutachtungen mit etwa 40 internationalen Experten gegliedert in 7 Fachbereiche.

Mit der Inbetriebnahme der ersten Instrumente wuchs deren Anzahl kontinuierlich. Heute, zehn Jahre nach der Inbetriebnahme und nach 9 Jahren Routinebetrieb der wissenschaftlichen Nutzung, sind es 27 Instrumente, die für die Forscher aus Deutschland und der ganzen Welt zur Verfügung stehen, weitere sind in Bau. Bereits bei der Inbetriebnahme des FRM II standen die Zeichen klar auf Expansion. Nach zweijähriger Bauzeit konnte ein neues Gebäude mit Büro- und Laborflächen im Mai 2007 eingeweiht werden. Es beherbergt zurzeit die Außenstellen der Helmholtz-Zentren am FRM II, nämlich dem Jülich Centre for Neutron Science (JCNS) vom FZ-Jülich und German Engineering Materials Science Centre (GEMS) vom Helmholtz-Zentrum Geesthacht. In weiser Voraussicht wurde diese Nutzungsfläche in den ersten Stock des neuen Ostgebäudes verlegt, worunter sich Platz für die Erweiterung der Nutzung des FRM II befindet: die neue Neutronenleiterhalle-Ost. Mit der Anbindung an das Reaktorgebäude im Jahr 2014 und der ersten Neutronen- und Positronenstrahlen in den beiden darauffolgenden Jahren soll die Anzahl der Instrumente auf über 30 steigen.



Das Neutronenspinechospektrometer aus Jülich wird in der Neutronenleiterhalle auf seinen Platz gebracht.

Enge Kooperation mit FZ-Jülich seit 2004

Die Forschungs-Neutronenquelle Heinz Maier-Leibnitz war schon immer als nationale Forschungseinrichtung konzipiert. Die hier geschaffenen einzigartigen Experimentiermöglichkeiten sollen Wissenschaftlern aus der gesamten Bundesrepublik zur Verfügung stehen und darüber hinaus auch von internationalen Forschern genutzt werden. Dieses Ziel vor Augen beteiligte sich der Bund von Anfang an sowohl an den Kosten der Anlage als auch über das Förderinstrument Verbundforschung an der Instrumentierung des FRM II. Die Schließung des DIDO-Reaktors in Jülich am 6. Mai 2006 veranlasste das FZ-Jülich bereits im Juni 2004, einen Kooperationsvertrag mit der TUM abzuschließen. Ziel war es, die Expertise der Jülicher Forscher und deren beste Instrumente an den FRM II zu bringen und dort eine Außenstelle mit ca. 30 Mitarbeitern zu gründen. Hierbei stießen wir bereits zu Anfang an unsere räumlichen Grenzen. Die etwa 40 m langen Kleinwinkelstreuapparaturen KWS-1 und KWS-2 brauchten mehr Platz in der Neutronenleiterhalle als verfügbar. Die erste Erweiterungsbaumaßnahme war somit die Verlängerung der Halle bis an die Außenwand des Atom-Eis. Seitdem überbrückt ein Wintergarten den Zwischenraum der beiden Anlagen.

Einen wesentlichen Schub für die wissenschaftliche Nutzung des FRM II gab nach der Schließung der Neutronenquellen in Jülich und Geesthacht (2010) die Kooperationsvereinbarung vom 17. Dezember 2010 zwischen dem Bayerischen Staatsministerium für Wissenschaft, Forschung und Kunst und dem Bundesministerium für Bildung und Forschung einerseits und zwischen der Technischen Universität München und den Helmholtz-Zentren in Jülich, Geesthacht und Berlin andererseits. Unterstützt durch zusätzliche finanzielle Mittel des BMBF wird die wissenschaftliche Nutzung wesentlich verstärkt gefördert. Viele Modelle der Zusammenarbeit wurden diskutiert. Die komplizierten



Hochdruckpresse des neuen Instruments für extreme Probenumgebungen des Bayerischen Geoinstituts, Universität Bayreuth.

Regelungen zwischen Bund und Ländern ergaben schließlich einen Kooperationsvertrag als einfache und für alle Beteiligten unkomplizierte Regelung. Da derartige Verträge üblicherweise keinen markanten, öffentlichkeitswirksamen Namen tragen, entschlossen wir uns, die enge Zusammenarbeit in der Gründung des Heinz Maier-Leibnitz Zentrums, kurz MLZ, darzustellen. Die Inauguration fand im feierlichen Rahmen am 21. Februar 2013 im Physik Department der TUM statt.

Neue Instrumente und Quellen

Ein Blick in die Zukunft ist ein Blick auf unsere Baustellen. Im Jahr 2014 soll die Anbindung der Neutronenleiterhalle-Ost an das Reaktorgebäude abgeschlossen sein. Im nächsten Jahr soll dann der Austausch der Stopfen vom Strahlrohr 5 und 6 erfolgen. Dann werden von Strahlrohr 5 insgesamt drei thermische Neutronenstrahlen in die Neutronenleiterhalle-Ost führen, welche insgesamt vier Instrumente bedienen werden. Zusätzlich wird ein weiterer Leiter mit kalten Neutronen für die Anwendung in der Teilchenphysik installiert. Strahlrohr 6 wird die zukünftige neue Quelle für ultrakalte Neutronen aufnehmen. Diese soll Instrumente sowohl in der Experimentierhalle als auch in der Neuro-

nenleiterhalle-Ost versorgen. Zudem ist geplant, die Instrumente, die Positronen nutzen, komplett in die neue Halle umzuziehen. Neue Experimente wie z.B. ein Positron-Elektron-Plasma in Zusammenarbeit mit dem benachbarten Max-Planck-Institut für Plasmaphysik können dann aufgebaut werden. Mit der steigenden Anzahl der Instrumente und der damit verbundenen immer effektiveren Nutzung steigt auch der Bedarf an Büro- und Laborarbeitsplätzen vor Ort. Auf dem Gelände des FRM II sollen zwei neue Büro- und Laborgebäude in Zusammenarbeit mit dem Forschungszentrum Jülich errichtet werden. Die Erwartung ist groß, insbesondere bei den Mitarbeitern, die in der Zwischenzeit in Bürocontainern untergebracht werden müssen.



Dr. Jürgen Neuhaus
Stellvertretender Wissenschaftlicher Direktor

Der FRM II kombiniert als Hochleistungsneutronenquelle Grundlagenforschung mit industrieller und medizinischer Nutzung. Seit dem 1. Januar 2011 erschließt das Heinz Maier-Leibnitz Zentrum (MLZ) die wissenschaftliche Nutzung des FRM II. Das MLZ repräsentiert die Zusammenarbeit zwischen der Technischen Universität München, dem Forschungszentrum Jülich, dem Helmholtz-Zentrum Geesthacht für Material- und Küstenforschung (HZG) und dem Helmholtz-Zentrum Berlin für Materialien und Energie (HZB, ruhende Partnerschaft). Diese Kooperation wird vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) und dem Bayerischen Staatsministerium für Bildung und Kultus, Wissenschaft und Kunst finanziell unterstützt. Eingebunden in diese Kooperation sind ferner Institute der Max-Planck-Gesellschaft und weitere neun Universitäten. Durch die Zusammenarbeit entsteht ein weltweit führendes Zentrum für Forschung mit Neutronen und Positronen.

Die Partner der Kooperation bauen und betreiben ein breites Spektrum erstklassiger Streuinstrumente, um wissenschaftlichen Fragestellungen beispielsweise aus der Physik, Chemie, Biologie, Geo-, Ingenieur- oder Materialwissenschaften nachzugehen. Das Heinz Maier-Leibnitz Zentrum unterstützt maßgeblich nationale und internationale Wissenschaftler bei der Lösung grundlegender aktueller Fragestellungen unserer Gesellschaft. Die folgenden Beispiele mögen die Breite und Relevanz der Wissenschaft am MLZ aufzeigen.

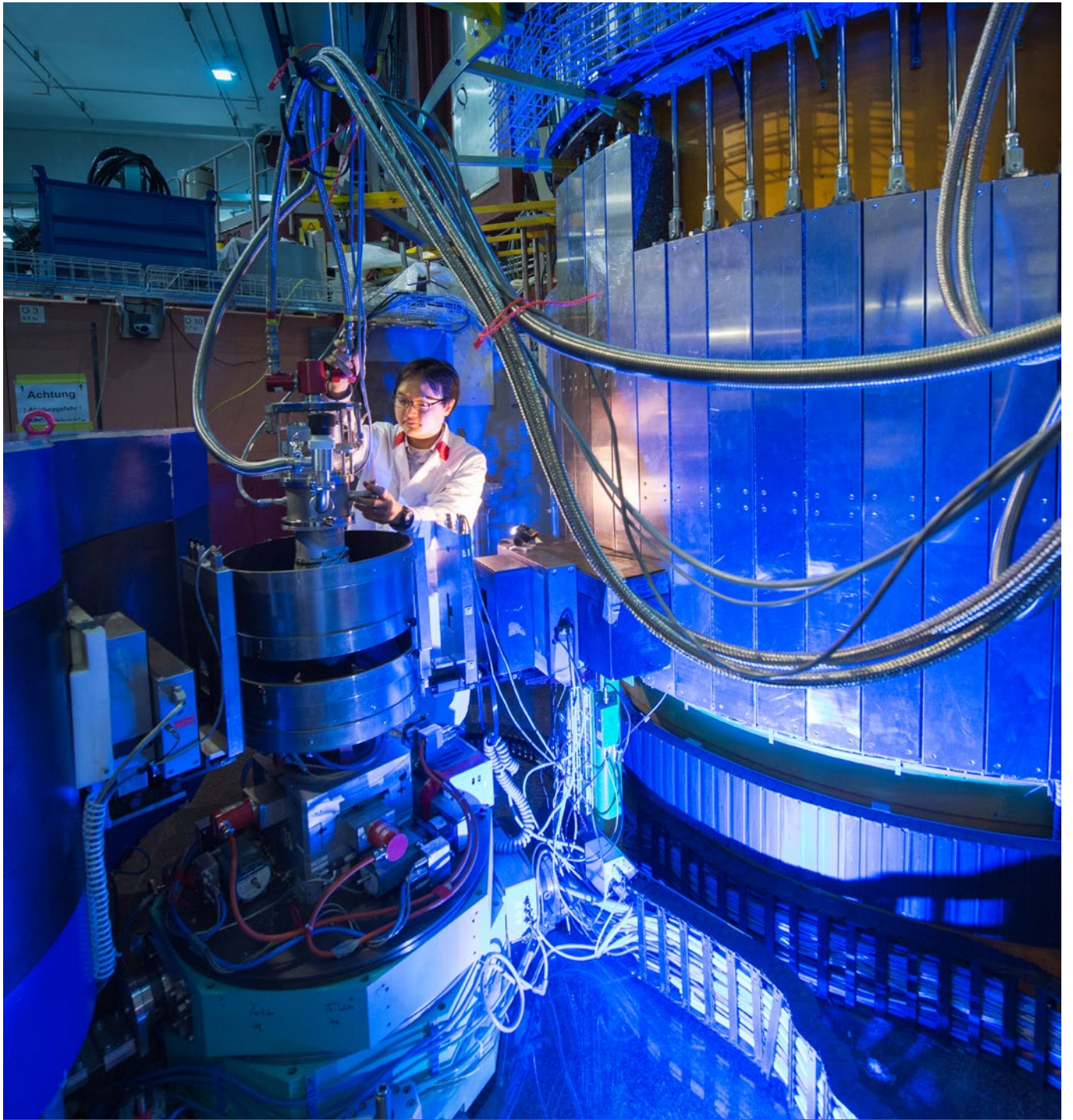
Energie

Widerstandsfreie Supraleiter sind das ultimative Ziel für Stromtransport und die Realisierung sehr hoher Magnetfelder. Wäre da nicht der Umstand, dass Supraleitung bis heute nur bei sehr tiefen Temperaturen realisiert ist. Selbst bei der Klasse der sogenannten Hochtemperatursupraleiter

mit Sprungtemperaturen bis zu ca. 130 K sind großtechnische Anwendungen noch in der Ferne. Umso wichtiger ist es, den Mechanismus der Supraleitung zu verstehen. Und hier spielen Neutronen die entscheidende Rolle. Experimente am Instrument TRISP des MLZ mit einer 100 mal besseren Auflösung als vorherige Messungen zeigten überraschend, dass bei klassischen Supraleitern wie Blei oder Niob Vorboten der Supraleitung selbst 100 K oberhalb der Sprungtemperatur beobachtet werden können. Der Mechanismus der Hochtemperatursupraleitung in den sogenannten Kupraten oder eisenhaltigen Arseniden beruht vermutlich auf einer Kopplung von Elektronen über magnetische Anregungen. Eine ganze Serie von Messungen internationaler Forschergruppen am MLZ hat recht eindeutige Hinweise auf einen solchen Mechanismus ergeben. Für die an sich schwachen Messsignale dieser Kopplung nutzen sie alle die einmalige Kombination von höchster Intensität von Neutronenstrahlen auf kleinsten Proben am MLZ. Supraleitung bei Umgebungstemperatur bleibt das ultimative Forschungsziel.

[S. Bayrakci et al., *Science* 312, 1926 (2006); P. Aynajian et al., *Science* 319, 1509 (2008); D. Inosov et al., *Nature Physics* 6, 178 (2010); Y. Li et al., *Nature* 468, 283 (2010); Y. Li et al., *Nature Physics* 8, 404 (2012)]

Heutige Elektronik oder Elektromobilität fragt nach kleineren, leichteren Batterien mit längerem Lebenszyklus und gesteigertem Energieinhalt. Lithium-Batterien mit Graphitelektroden sind die zurzeit dominierende Lösung. Ihre weitere Verbesserung erfordert detailliertes Verständnis der atomaren Vorgänge bei Ladung und Entladung in den Elektroden als auch im Elektrolyt. Hochauflösende Neutronenbeugung am MLZ an Lithium-Batterien vom Typ 18650 hat mit bis dahin unbekannter Genauigkeit die Einlagerung des Lithiums in die Graphitelektroden bei Beladung, Entladung und verschiedener Zykluszahl aufgezeigt. Die hierbei neugefundene Form der Einlagerung des Lithiums zwischen den



Forschung an Supraleitern mit dem Dreiachsenspektrometer PUMA.

Graphenschichten gibt entscheidende Hinweise für die weitere Verbesserung der Batterien.

[A. Senyshyn et al., J. Electrochem. Soc. 160, A 3198 (2013)]

Organische Solarzellen bieten neue Möglichkeiten der Energieumwandlung jenseits der heute gebräuchlichen siliziumbasierten Solarzellentechnologie. Basierend auf organischen Materialien wird Licht in Strom umgewandelt. Bei hybriden organischen Solarzellen werden leitfähige, photoaktive Polymere für diese Aufgabe eingesetzt. Diese werden in ein Metalloxidnetzwerk infiltriert, was sehr dünne und flexible Bauelemente ermöglicht. Diese neuartigen Bauelemente können vollkommen neue Einsatzfelder für Solarzellen erschließen, da sie leicht und damit portabel sind. Die Grenzfläche zwischen Polymer und Metalloxid ist hierbei von zentraler Bedeutung, da an dieser die Energieumwandlung stattfindet. Mittels oberflächensensitiver Neutronenkleinwinkelstreuung konnte erstmals am MLZ diese komplexe innere Grenzfläche untersucht werden. Durch das weltweit einmalige Instrument am MLZ konnte, mit einem breiten Neutronenwellenlängenband, tiefenaufgelöst die Struktur mit Nanometergenauigkeit bestimmt werden. Es wurden Strukturen aus kommerziellen Materialien mit speziellen maßgeschneiderten Nanostrukturen verglichen. In Zukunft soll die Rückfüllung der Metalloxidnanostrukturen zeitaufgelöst untersucht werden. Diese Untersuchungen erlauben es, die Effizienz der organischen Solarzellen weiter zu steigern.

[M. Rawolle et al.; ACS Appl. Mater. Interfaces 5, 719 (2013)]

Nanowissenschaft und Engineering

Benetzungsmittel und Mikroemulsionen werden vermehrt in der Förderung von Schieferölen eingesetzt. Für eine Steigerung der Fördermengen müssen Viskosität der Flüssigkeit und Oberflächenspannung der porösen Gesteinsschichten aufeinander angepasst sein. Hochauflösende Neutronenspektroskopie am MLZ hat nun erstmals den

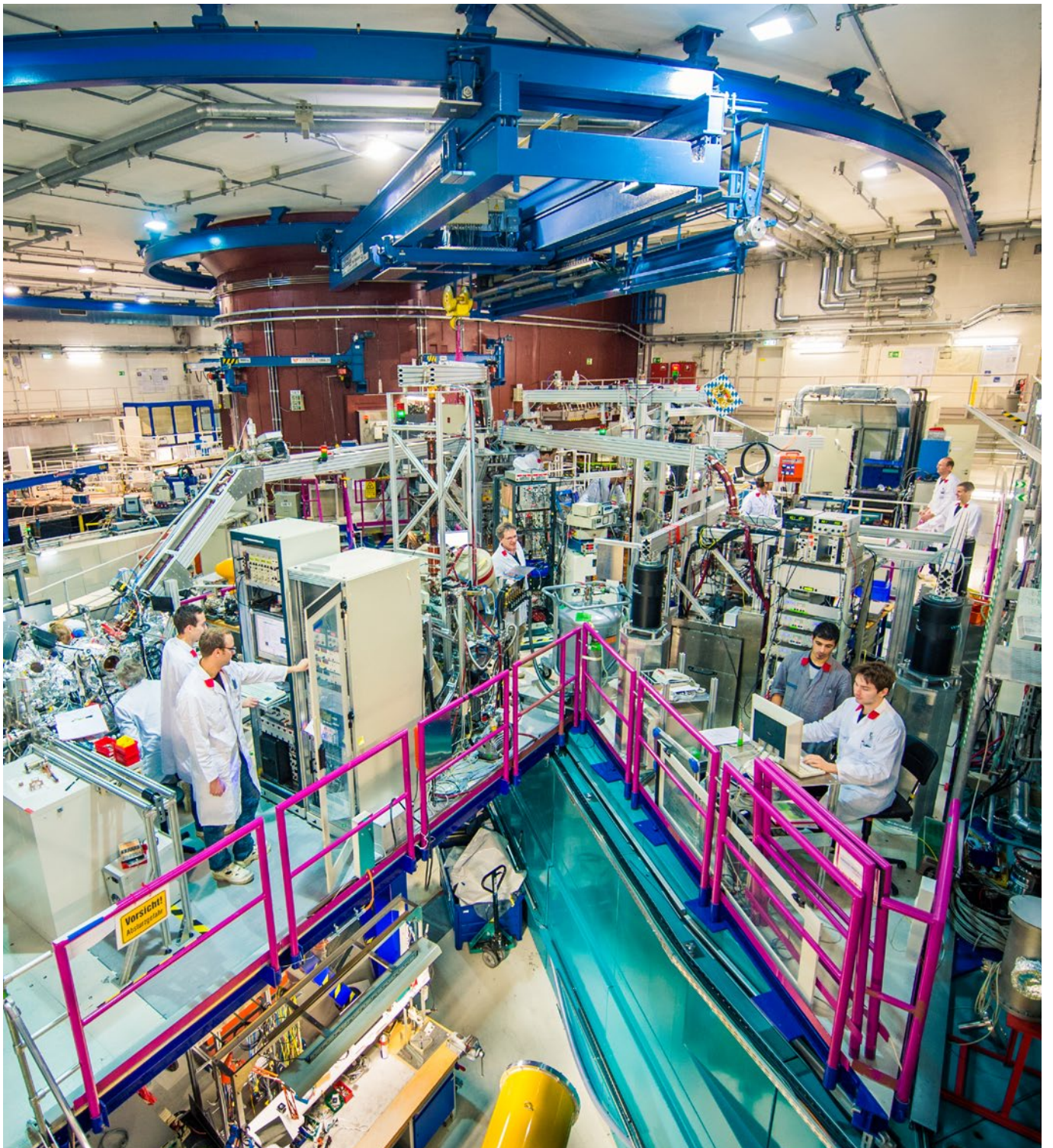
Geschwindigkeitsgradienten von lamellaren Mikroemulsionen als Funktion des Abstands von einer hydrophilen Grenzfläche bestimmt. Möglich wurden diese Messungen wegen des extrem niedrigen Untergrundes erst an den Messplätzen des MLZ. Es stellte sich heraus, dass an der Grenzfläche die Dynamik der Mikroemulsion um einen Faktor 3 erhöht ist im Vergleich zum Bulk. Diese Untersuchungen helfen die Ergiebigkeit von Ölfeldern zu steigern.

[H. Frielinghaus et al., Phys. Rev. E 85, 041408 (2012)]

Zweiseitig verankerte Polymere werden als intelligente Additive zu Mikroemulsionen betrachtet. Sie vermögen die mikroskopischen Öl- und Wasserdomänen in der Mikroemulsion zu verbinden, was besonders attraktiv ist für das Recycling von Kühlmitteln bei der spanabhebenden Metallverarbeitung. Hier möchte man das Öl und das kostenintensive Tensid durch das Polymer gegenüber dem Wasser zusammenhalten und so zur Wiederverwendung leichter abtrennen. Mittels Neutronenstreuung unter kleinem Winkel am MLZ wurde die Domänenstruktur der Mikroemulsion mit dem neuartigen Additiv charakterisiert und mit den Bedingungen der Mischbarkeit von Öl und Wasser verknüpft. Als Nächstes steht der Nachweis dieses Konzepts der unterstützten Abscheidung auf industrieller Skala an.

[S. Maccarrone et al., Langmuir (2014), DOI: 10.1021/la404354w]

Die Festigkeit jedes metallischen Werkstücks wird beim Herstellungsprozess durch eine gezielt eingebaute Defektstruktur bestimmt. Der weltweit mit Abstand intensivste Positronenstrahl am MLZ eröffnet völlig neue Möglichkeiten, den Aufbau der Defektstruktur in-situ und zerstörungsfrei, d.h. während Verformung, Ausheilung oder anderer Prozesse zu studieren. Wissenschaftler der TU Graz haben nun mittels der Positron-Elektron-Vernichtungsstrahlung am MLZ die Einstellung der Defektstruktur in nanokristallinem Kupfer und Nickel während einer gezielten Erwärmung auf kurzer



Die weltweit intensivste Positronenquelle befindet sich in der Experimentierhalle des FRM II.

Zeitskala beobachtet. Trotz ihrer Härte sind nanokristalline Metalle oft plastisch gut verformbar. Sie besitzen auf atomarer Ebene Fehlstellen ganz unterschiedlichen Typs, die dann für die gewünschte Kombination von Härte und Plastizität verantwortlich sind. Die weltweit höchste Brillanz des Positronenstrahls am MLZ ermöglicht es, solche Messungen nun tiefen- und orts aufgelöst durchzuführen, um so lokale Variationen der Defektstruktur mikrometergenau zu verfolgen.

[B. Oberdorfer et al., Phys. Rev. Lett. 105 146101 (2010)]

Brillengestelle aus Nickel-Titan-Legierungen sind hochflexibel. Wie kommt es, dass eine metallische Legierung sich annähernd gummiartig verhält? Wirkt eine äußere Kraft auf solche Legierungen, ändert der mikrokristalline Aufbau sprunghaft seine Struktur. Wirklich alle Atome ordnen sich neu. Wird die äußere Kraft zurückgenommen, erinnern sich die Atome wieder ihrer alten Struktur, klappen in diese zurück und das Brillengestell nimmt wieder seine ursprüngliche Form an. Formgedächtnislegierungen sind also pseudoelastisch. Zahnspannen aus der gleichen Legierung nützen ebenfalls diese außerordentlich große Pseudoelastizität. Neuere Formgedächtnislegierungen auf Ni₂Mn-Ga-Basis lassen sich nun durch äußere Magnetfelder in ihrer Form verändern, es werden Längenänderungen von bis zu 10 % beobachtet. Sie sind hochinteressante Materialien für Magnetfeldsensoren, Aktuatoren oder auch für kleinste Kühlaggregate. Sie lassen sich fast so schnell schalten wie Piezoquarze, zeigen aber größere Längenänderungen. Um ihre Funktionalität zu optimieren, müssen die Kräfte und Wege beim Umrorden der Atome genauestens studiert werden. Mit Experimenten, die die Änderung der Neutronenwellenlänge beim Streuprozess vermessen, haben Forscher am FRM II dies mit bisher unbekannter Präzision bewerkstelligt.

[S. Ener et al., Phys. Rev. B 86, 144305 (2012); S. Ener et al., New J. Phys. 15, 123016 (2013)]

Fortschritte in der Informationsspeicherung und Verarbeitung erfordern eine Miniaturisierung bis auf die atomare Skala und eine drastische Reduktion der Wärmeerzeugung. Zwar haben heute magnetische Domänen, deren Ausrichtung die Information speichert, nur noch Längen von wenigen 10 Nanometern. Ultimatives Ziel ist aber die Speicherung in der magnetischen Ausrichtung einzelner Atome. Kürzlich haben Forscher am MLZ in Legierungen wie Mangansilizium die Ausbildung von magnetischen Wirbeln entdeckt, die prinzipiell als solche atomaren Speicher dienen könnten. Insbesondere lassen sich diese Wirbel mit sehr geringen Strömen verschieben, d.h. Information ist mit wenig Wärmeentwicklung schaltbar. Noch hat die Sache einen Haken: diese Effekte treten bei 25 K und nur unter Anwendung von Temperaturgradienten auf. Aber es gibt bereits Ansätze, diese Effekte auch bei Raumtemperatur zu beobachten.

[S. Mühlbauer et al., Science 323, 915 (2009); F. Jonietz et al., Science 330, 1648 (2010); P. Milde et al., Science 340, 1076 (2013)]

Diese magnetischen Wirbel weisen auf neuartige topologische Beschreibungen von atomarem Magnetismus hin, nämlich magnetischen Monopolen. Was eigentlich unserer Anschauung von magnetischem Fluss zwischen Nord- und Südpol widerspricht! Neutronenuntersuchungen am MLZ an dem Ferromagneten Yb₂Ti₂O₇ haben nun gezeigt, wie sich solche Monopole als magnetischer Defekt herausbilden. Theoretisch kann diese Herausbildung mit Kräftefeldern analog zum Higgs-Mechanismus zur Erzeugung von Masse beschrieben werden.

[L.-J. Chang et al., Nature Communications 3, 992 (2012)]

Magnetische Schichten und Heterostrukturen sind die Grundbausteine für eine große Anzahl magnetoelektronischer Bauteile wie z.B. Leseköpfe von Festplatten, magnetische Speicher (MRAM) oder



Forschung an einem niedrig angereicherten Brennstoff.

Magnetfeldsensoren. Idealerweise möchte der Entwicklungsingenieur wissen, wie sich der Magnetismus von Atomlage zu Atomlage aufbaut und gegebenenfalls verändert. Genau dies erlauben nun erstmals Streuexperimente unter streifendem Einfall mit polarisierten Neutronen – hier sind alle Neutronen mit ihrem magnetischen Moment ausgerichtet. Physiker des MLZ und von der Universität Augsburg haben so in-situ den sukzessiven Aufbau des Magnetismus jeder einzeln aufgebrachten atomaren Eisenlage und dessen Modifikation beobachtet, wenn andere magnetische Atomlagen wie z.B. von Chrom hinzukommen. Hier wird die Funktionalität neuer magneto-elektronischer Bausteine optimiert.

[<http://www.trr80.de/trr80/>]

Lebenswissenschaften und Gesundheit

Die Art der Faltung von Proteinen ist zentral für ihre Funktionalität. Diese Faltung wird vor allem durch Wasserstoffbrückenbindungen bestimmt. An einem speziell für die Proteinkristallographie errichteten Instrument am MLZ wurde nun der Mechanismus aufgeklärt, wie Bakterien β -Lactam-Antibiotika verdauen und damit resistent werden. Mit diesem Mechanismus können Strategien zur Vermeidung von Antibiotikaresistenzen entwickelt werden.

[S. J. Tomanicek et al., J. Biol. Chem. 288, 4715 (2013)]



Vorbereitende Forschung für die Messung mit ultrakalten Neutronen.

Augenkrankheiten wie Retinitis pigmentosa und altersbedingte Makuladegeneration (AMD) führen zur millionenfachen Erblindung. Glücklicherweise sind bei diesen Krankheiten lediglich die Lichtrezeptoren beschädigt, und das darunterliegende neuronale Netzwerk bleibt intakt. Mit künstlichen Netzhaut-Implantaten auf Polymerbasis können Neurotransmitter durch einen lichtinduzierten reversiblen Prozess das neuronale Netzwerk chemisch stimulieren und die Sehfähigkeit von Patienten zumindest teilweise wiederherstellen. Forscher am MLZ nutzen die einzigartige Sensitivität der Neutronen auf Wasserstoff, um die Position der Neurotransmitter sowie den Verlauf des lichtinduzierten Freisetzungsprozesses der Neurotransmitter zu beobachten.

[N. Paul et al., *Soft Matter* 9, 1364 (2013); N. Paul et al., *Soft Matter* 9, 10117 (2013)]

Seit Jahrzehnten wird Lithium zur Behandlung psychischer Krankheiten eingesetzt. Es hebt die Stimmung und senkt das Aggressionspotential. Lithium reagiert sehr speziell mit Neutronen, es zerfällt in ein Helium- und Tritiumatom. Mit einem speziellen Detektor, entwickelt am MLZ, wurde Lithium in höherer Anreicherung in der weißen als in der grauen Substanz von Gehirnschnitten entdeckt. Mit einer zuvor nie erreichten Empfindlichkeit von 0,45 Nanogramm auf ein Gramm und räumlicher Auflösung unter 1 mm konnte so festgestellt werden, dass Lithium im Gegensatz zu anderen Psychopharmaka vor allem in den Nervenzellen wirkt. Ziel des gemeinsamen Forschungsprojektes zwischen TUM und der Rechtsmedizin am Klinikum Großhadern ist es, eine Landkarte der Lithiumanreicherung im Gehirn zu erstellen, um die Wirkung des Stoffes auf die menschliche Psyche besser verstehen zu können.

[J. Lichtinger et al, *Med. Phys.* 40, 023501 (2013)]

Messung mit höchster Präzision

Extreme Messpräzision bietet eine komplementäre Möglichkeit zur Untersuchung des frühen Universums. Diese einzigartige Alternative rückt immer mehr in den Fokus der Wissenschaftler, da man damit weiter ins frühe Universum zurückblicken kann als mit heutigen Hochenergiebeschleunigern. Einer der vielversprechendsten Ansätze wird am FRM II verfolgt: hier versucht man, kleinste Störungen in den Eigenschaften des Neutrons zu entdecken, die solche Rückschlüsse ermöglichen. Zur Durchführung dieser Messungen wurde eine einzigartige Arbeitsumgebung aufgebaut. Diese beinhaltet das kleinste Magnetfeld und den kleinsten Magnetfeldgradienten über einen Kubikmeter, welche jemals von Menschen geschaffen wurden. Während die ersten ultrakalten Neutronen am FRM II noch etwas dauern werden, so konnten mit der Realisierung solcher einzigartigen Messmöglichkeiten bereits Spin-offs und Synergien mit angewandten Forschungsgebieten – z.B. Niedrigfeld NMR – geschaffen und genutzt werden.

[DFG-Exzellenzcluster „Origin and Structure of the Universe“]

Kulturerbe

Treffen sich die Neugier des Naturwissenschaftlers und die des Museumskonservators, wird es spannend. Gemeinsam mit der Archäologischen Staatssammlung München sind die Physiker des MLZ der Frage nachgegangen, wie die Serienproduktion von Nippes bei den Römern funktionierte. Neutronentomographie erlaubte kontrastreich, völlig zerstörungsfrei und mit Mikrometer-Genauigkeit einen Blick ins Innere einer kleinen Merkur-Statue. Die Bronzefigur des Götterboten Merkur entpuppte sich als innen hohl, durch ein nachträglich angebrachtes Türchen mit Schrott gefüllt und die Beine im Nachhinein angesetzt. Klare Indizien für eine antike Massenproduktion.

[Rupert Gebhard, *Blick ins Innere – Funde durchschaut*, Archäologie in Deutschland 5, 30 (2009)]



Mit der Neutronenradiografie (rechts) sieht man die Gusstechnik einer antiken Statuette des Gottes Merkur.

Um die bestmögliche Restaurierungsmethode für eine Bronzeplastik aus Florenz herauszufinden, wurde sie am MLZ untersucht. Es handelte sich dabei um einen der Prophetenköpfe der berühmten Paradiespforte des Baptisteriums San Giovanni. Der Künstler Ghiberti hatte die Pforte um 1425 gefertigt. Im Laufe der Jahre war die Bronze schwarz angelaufen. Neutronentomographie am MLZ zeigte zunächst den unsichtbaren inneren Aufbau der Plastik mikrometergenau auf. Eine vergleichende Prompte Gamma-Aktivierungsanalyse belegte zerstörungsfrei, dass nicht die Laserreinigung sondern die chemische Reinigung der Restauratoren die schwarzen Ablagerungen effizienter entfernte. Die Untersuchungen führten zur erfolgreichen Restaurierung der Plastik.

[G. Festa et al., J. Appl. Phys. 106, 074909 (2009)]

Umstellung auf niedrig angereichertes Uran

Das Kompaktbrennelement des FRM II stellt höchste Anforderungen an Strahlenresistenz und Wärmeleitung, müssen doch die Spaltprodukte sicher eingeschlossen bleiben und auf einem Volumen von ca. 20 Liter insgesamt 20 MW an thermischer Leistung sicher abgeführt werden. Mit dem Ziel, das Brennelement von jetzt hochangereichertem Uran-235 auf niedrigere Anreicherung umzustellen, werden am FRM II in internationaler Zusam-

menarbeit hochdichte Brennstoffe auf Basis einer Uran-Molybdänlegierung entwickelt. Deren Verhalten unter Abbrand wird normalerweise in sich über Jahre erstreckende Testbestrahlungen erprobt. Mit dem auf dem Campus in Garching vorhandenen Beschleuniger hat die TUM ein Verfahren etabliert, um solche Bestrahlungen im Zeitraffer in einem Tag zu simulieren. Bahnbrechendes Ergebnis dieser Forschung ist der Nachweis der Wirksamkeit der Beschichtung der Uran-Molybdän-Körner mit einer metallischen Schutzschicht, um so unvermeidliches Schwellen während des Abbrands zu kontrollieren. Langfristiges Ziel dieser Forschung ist die Umrüstung des FRM II auf ein Brennelement mit niedrigerer Anreicherung.

[H.-Y. Chiang et al., J. Nucl. Mater. 440, 117 (2013)]

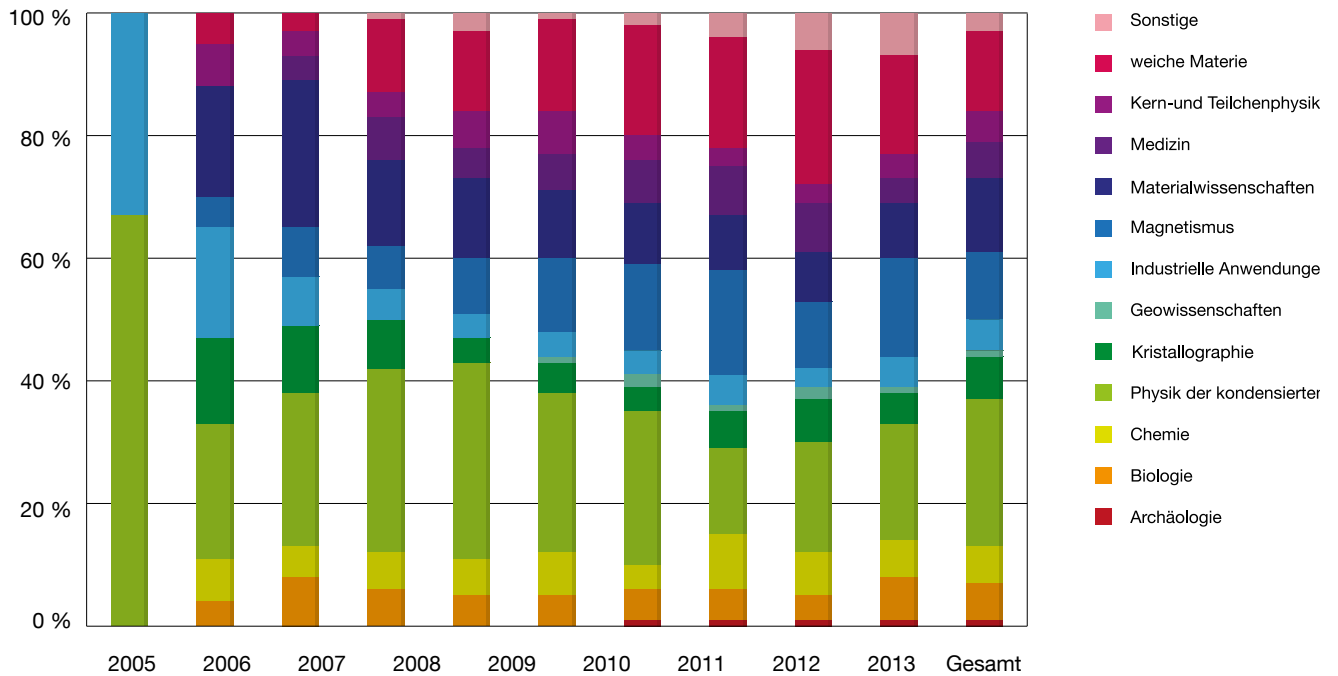
Das MLZ in Zahlen

Durchschnittlich sind die Instrumente um das doppelte überbucht, das heißt: Die Nachfrage nach Messzeit ist doppelt so hoch wie das Angebot.

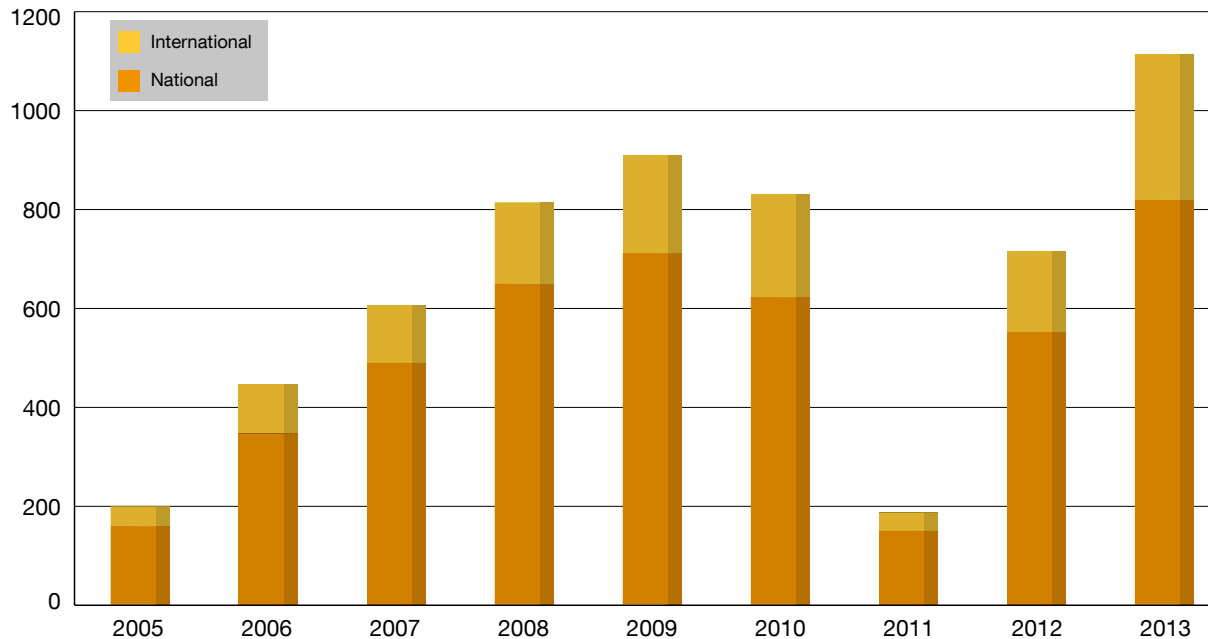
Auch die Zahl der Mitarbeiter auf dem gesamten Gelände des FRM II ist um ein Vielfaches angewachsen. Inzwischen sind über 400 Personen innerhalb des Zaunes beschäftigt, ob nun bei der Technischen Universität München, dem Forschungszentrum Jülich, dem Helmholtz-Zentrum Geesthacht oder einer der Partneruniversitäten und -institute oder der Firmengruppe der Isotopen Technologien München AG.



Prof. Dr. Winfried Petry
Wissenschaftlicher Direktor



Durchgeführte Experimente nach Fachgebieten.



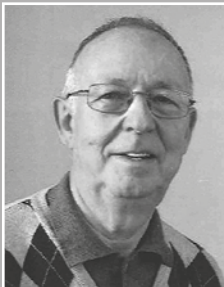
Anzahl der Experimente pro Jahr.

Prof. Dr. Götz Eckold, Georg-August-Universität Göttingen, Vorsitzender des Instrumentierungsausschusses von 2001 bis 2006, Vorsitzender des Komitees Forschung mit Neutronen 2008 bis 2011

„Die Neutronenlandschaft in Deutschland hat sich im neuen Jahrtausend dramatisch verändert. Mit der Außerbetriebnahme der Neutronenquellen in Jülich und Geesthacht und der avisierten Abschaltung des BER2 bis zum Jahre 2020 wird der FRM II in Garching die einzige nationale Neutronenquelle sein, die für die interdisziplinäre Spitzenforschung an kondensierter Materie zur Verfügung steht. Mit seinem hohem Fluss, der zukunftsweisenden und zum großen Teil innovativen Instrumentierung und nicht zuletzt mit der Beteiligung von verschiedenen Universitäten und Forschungszentren hat der FRM II seit seiner Inbetriebnahme neue Maßstäbe gesetzt, die ihn zu einer der führenden Einrichtungen weltweit gemacht haben. Mit der finanziellen Unterstützung der Freistaates Bayern und des Bundes wird es sicher gelingen, weitere Experimentiereinrichtungen und den geplanten Neutronenleiterhallen Ost und Süd zu schaffen, welche die Leistungsfähigkeit weiter steigern und den FRM II auch über die nächsten Dekaden hinaus für Forscher aus dem In- und Ausland attraktiv machen. Das gilt insbesondere, da der FRM II komplementäre Experimentiermöglichkeiten zur zukünftigen Europäischen Spallationsquelle bietet, die unverzichtbar sind für die Entwicklung der Forschungslandschaft in Deutschland und Europa.“



Ministerialdirektor a.D. Dr. Herrmann Schunck, Ministerialdirektor im Bundesministerium für Bildung und Forschung 1987 bis 2005

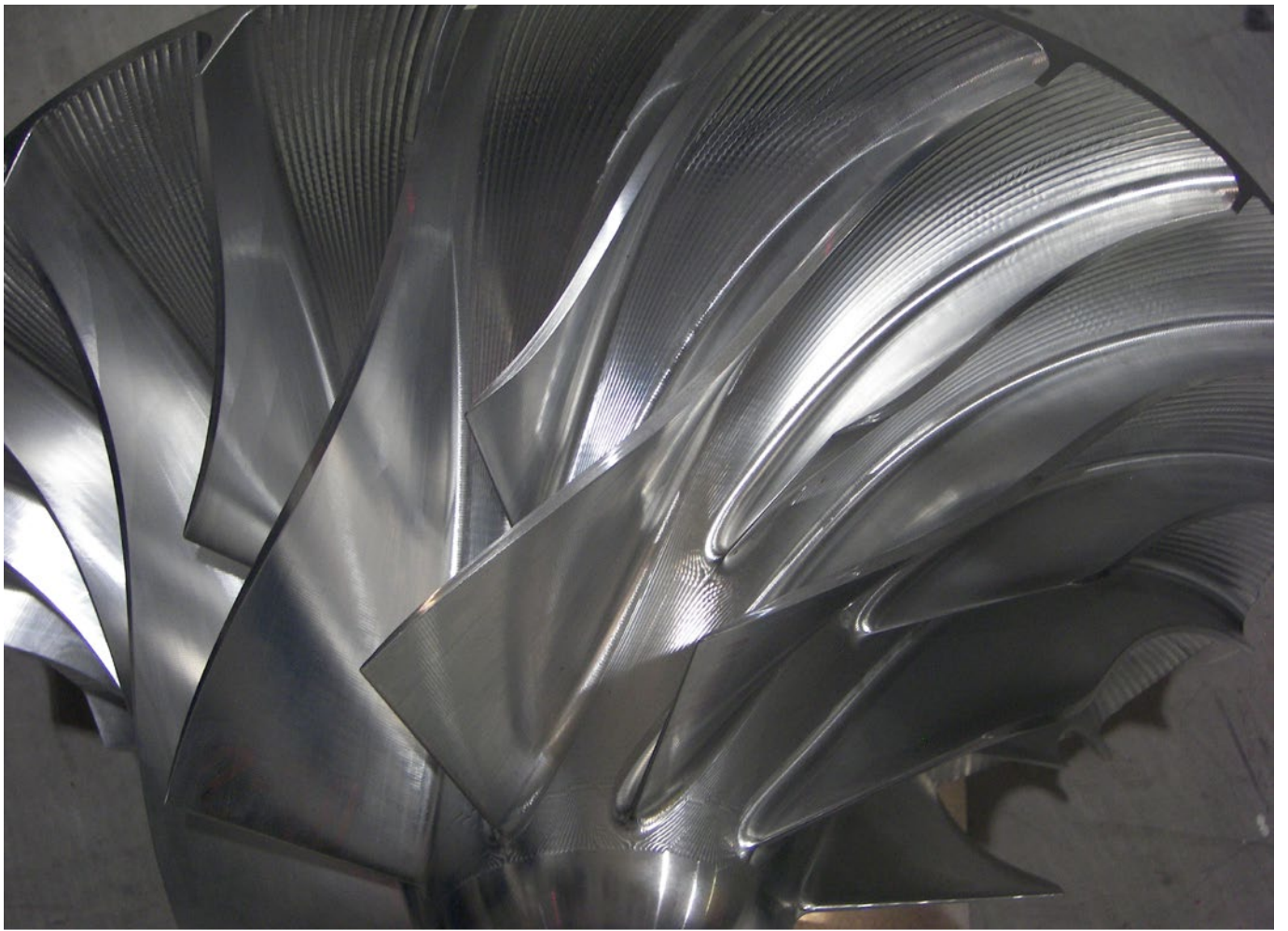


„Als Beamter des Bundesforschungsministeriums habe ich den FRM II über die gesamte Planungs- und Bauzeit begleitet. Dabei konnte ich helfen, einige Hindernisse zu beseitigen, die der Fertigstellung und schließlich der Inbetriebnahme des Reaktors entgegenstanden. Die Bedeutung moderner und leistungsfähiger Neutronenquellen für die deutsche Forschungslandschaft erschloss sich mir durch vielfältige Kontakte in die Wissenschaft sowie die Mitarbeit in internationalen Beratungsgremien. Um eine Konzentration sowohl der intellektuellen als auch der finanziellen Ressourcen zu erreichen, setzte ich mit frühzeitig für eine Neuordnung der Landschaft der Neutronenquellen in Deutschland ein. Ein sichtbares Ergebnis davon ist das Jülich Centre for Neutron Science am FRM II.“

Prof. Dr. Gernot Heger, RWTH Aachen, Vorsitzender des Instrumentierungsausschusses 1996 bis 2001 und des Strategierats 2003 bis 2010



„Das Projekt FRM II war für mich von Anfang an eine Chance die Forschung mit Neutronen in Deutschland auf hohem Niveau zu entwickeln und längerfristig zu sichern. Ich konnte in wesentlichen Gremien des FRM II mitarbeiten und dabei das reiche Spektrum der methodischen Entwicklungen und wissenschaftlichen Fragestellungen mit gestalten. Ich bin überzeugt, dass die Forschung mit Neutronen einen wichtigen unverzichtbaren Beitrag zu vielen grundlegenden Fragen der Physik, Chemie, Biologie und Medizin, Geo- und Materialwissenschaften sowie zu relevanten Anwendungsproblemen in den Ingenieurwissenschaften leisten kann. Auf Initiative des Freistaates Bayern konnte mit dem FRM II ein international führendes Zentrum für die Forschung mit Neutronen (jetzt Heinz Maier-Leibnitz Zentrum) in Deutschland im Rahmen der TU München realisiert werden. Zu diesem Erfolg hat ganz wesentlich die aktive Beteiligung von Forschergruppen aus ganz Deutschland - von Universitäten sowie Forschungseinrichtungen der Helmholtz-Gemeinschaft und der Max-Planck-Gesellschaft - beigetragen.“



Industrielle und medizinische Nutzung

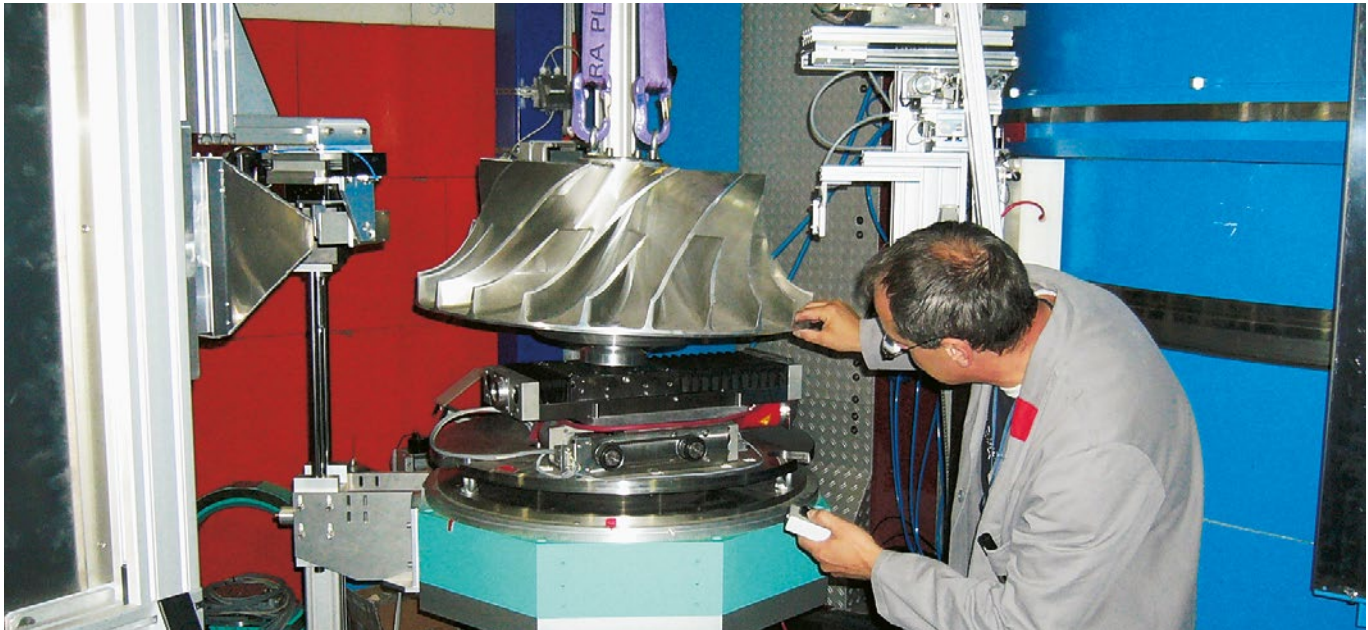
Die Entscheidung des Freistaats Bayern und der Technischen Universität München, am Standort des Atom-Eis in Garching die neue deutsche Neutronenquelle zu errichten, ging einher mit dem Wunsch, die Überführung von Grundlagenforschung mit Neutronen in industrielle Forschung und Produktion klar sichtbar zu machen. So wird die Neutronenquelle heute zu etwa 30 % für angewandte Forschung bis hin zur industriellen Produktion genutzt. Während die kommerziellen industriellen Anwendungen sich im Wesentlichen auf die Bestrahlungseinrichtungen konzentrieren werden die wissenschaftlichen Streuinstrumente industriell vor allem für die angewandte Materialforschung genutzt.

Hierzu eröffnen sich der Industrie zwei Wege der Zusammenarbeit mit der Neutronenquelle: Wünscht der kommerzielle Auftraggeber alleiniger Eigentümer des Untersuchungsergebnisses zu sein, wird das Projekt als reine Auftragsarbeit mit voller Kostenübernahme des Auftraggebers durchgeführt. Der Auftraggeber hat hier zeitlich privilegierten Zugang, Messung und Auswertung werden durch die Experten des MLZ durchgeführt. Der Kunde bekommt ein Komplettpaket. Weit öfter sind die Fragestellungen der industriellen Forschung von grundlegender Natur, so dass sie den Schulterschluss mit der Forschung im öffentlichen Raum sucht und es entstehen gemeinsame Entwicklungsprojekte zwischen Neutronenquelle und industriellem Partner. Oft ist solche industrielle Forschung in größere thematische und öffentlich geförderte Kooperationen mit der Industrie eingebettet. Selbstverständlich sind alle Ergebnisse dieser wissenschaftlichen Kooperationen über Publikationen der Allgemeinheit zugänglich.

Dem verstärkten Wunsch der Industrie, die einmaligen Möglichkeiten der Neutronen zur zerstörungsfreien, in-situ- und in-operando-Charakterisierung

von Materialien und Werkstücken zu nutzen, hat die Neutronenquelle durch den Bau von Instrumenten spezialisiert auf industrielle Bedürfnisse Rechnung getragen. Das sind zum einen die Instrumente zur Durchleuchtung von massiven Objekten wie zum Beispiel Automotoren, Brennstoffzellen oder Batterien – das unsichtbare Innere sichtbar machen –, zum anderen Beugungsinstrumente, welche atomare Strukturen, innere Spannungen oder Texturen aufklären – vom atomar Kleinen her die makroskopische Funktion optimieren. Die oft einfachste Frage, nämlich aus was besteht ein Material, wird mit hochempfindlichen Elementanalyseverfahren wie der Aktivierungsanalyse angegangen. Die Neutronenaktivierung hält mit der unglaublich hohen Nachweiswahrscheinlichkeit von $1/10^{15}$ den Rekord im Nachweis minimalster Verunreinigungen mit Fremdatomen in hochreinem Silizium.

Die Projekte entstehen aus ganz unterschiedlichen Branchen und mit breit gestreuten Zielen: von der Technologie- und Materialentwicklung über die Qualitätssicherung bis hin zu medizinischen Fragestellungen. Waren es anfangs noch im Wesentlichen die einfache Charakterisierungen von Bestandteilen in Baukomponenten, so sind es heute oft Untersuchungen der Mikrostruktur von hochwertigen Werkstoffen bis hin zu Bestrahlungen von mechanischen und elektronischen High-Tech Komponenten. Neutronenstrahlen zeichnen sich durch hohe Eindringtiefe in alle Art von Materialien und besonders kontrastreiche Darstellung der atomaren oder molekularen Strukturen aus. Deshalb eignen sie sich besonders für zerstörungsfreie in-situ und in-operando-Messungen, d.h. die direkte Beobachtung der Veränderung einer Komponente unter dem Einfluss von äußeren Parametern wie Temperatur, Druck, Zugspannung, Magnet- oder elektrischem Feld und dies auch an sehr großen Bauteilen. Bei den Material- und Werkstoffwissenschaften stehen besonders Herausforderungen im



Untersuchungen von Eigenspannungen in einem Turbinenrad.

Fokus wie hohe Temperaturbeständigkeit und Zugfestigkeit (Superlegierungen), leichtere Bauweise (Aluminium-Legierungen) oder die Entwicklung von neuartigen Materialien wie Stählen. Neben den klassischen Streumethoden kommen auch die Bestrahlungseinrichtungen zum Einsatz. So bietet die Neutronenaktivierungsanalyse beispielsweise die fehlerfreie Multi-Element-Analyse, die Erfassung von kleinsten Konzentrationen von Fremdatomen im sub-ppm-Bereich zur homogenen Dotierung von Materialien für die Supraleitung oder die Aktivierung von Komponenten für Objektträger in Technik und Medizin als auch Radioisotope für Tracerversuche.

Optimierung von Flugzeugisolierungen

In Flugzeugen treten innerhalb von sechs bis zehn Jahren Flugbetrieb aus dem Atem der Passagiere mehrere hundert Kilogramm Wasserdampf aus, dringen durch die Kabine in die Isolierung des

Rumpfes und kondensieren auf der kalten Außenwand zu Wasser oder Eis. Diese Wassermenge entspricht dem Gewicht von mehreren Passagieren und verursacht zusätzliche Treibstoffkosten. Die Isolierung selbst leidet durch diese Feuchtigkeit und es können Kurzschlüsse im elektrischen System auftreten.

Das Institut für Thermofluidynamik der Technischen Universität Hamburg-Harburg (TUHH) hat daher zusammen mit dem Industriepartner XRG Simulation GmbH dieses Problem untersucht. Zunächst war es nötig, genau zu wissen, wie das Wasser in die Isolierung gelangt, ob es den Weg über den flüssigen Zustand zurück legt oder sofort gefriert und wo es sich ansammelt: in der Isolierung oder an der Außenwand. Die Wissenschaftler untersuchten daher die Isolierung mit der Neutronen-Radiographie / Tomographie am Instrument ANTARES in einer speziell entwickelten Versuchskammer, die die Feuchtigkeits- und Temperatur-

bedingungen während der Startphase, des Fluges und der Landung simuliert. Eine Spezialkamera zeigte die Verteilung des Wassers in der Isolierung während der verschiedenen Flugphasen mit hoher räumlicher Auflösung. Mit diesen Bildern ist es nun möglich, die Simulationsmethoden zu überprüfen und zu verbessern und damit wirksamere Isolierungen zu entwickeln.

Innere Spannungen in Gussbauteilen

Innere Spannungen in Werkstücken sind von erheblicher Bedeutung für die Stabilität eines Materials. Eigenspannungen entstehen beispielsweise bei Verbundguss-Werkstücken, wenn zwei verschiedene Metalle beim Abkühlen unterschiedlich schrumpfen. Dies führt im schlimmsten Fall zu Rissen in den entsprechenden Bauteilen. Um diese inneren Spannungen zerstörungsfrei zu messen werden mit Hilfe der Neutronenstrahlen die Atomabstände in einem wohldefinierten, kleinen Volumen bestimmt. Druckspannungen verringern geringfügig die Atomabstände, Zugspannungen bewirken das Gegenteil. Wissenschaftler des Lehrstuhls für Umformtechnik und Gießereiwesen der Technischen Universität München untersuchten die auftretenden Spannungen in einem Stahlzylinder, der von einer flüssigen Aluminiumlegierung umgossen wurde. Dieser Vorgang entspricht etwa der Herstellung eines Motorblocks mit Stahllaufbuchsen.

Die Spannungen während des Abkühlens an dieser Verbundgussform aus Aluminium und Stahl wurden erstmals mit Neutronen in-situ am Instrument STRESS-SPEC untersucht. Das Problem: Das Aluminium zieht sich beim Abkühlen doppelt so stark zusammen wie der Stahl. Das Ergebnis zeigte jedoch, dass Spannungen, die einer Last von bis zu 20 Kilogramm pro Quadratmillimeter entsprechen, erst ab einer Abkühl-Temperatur von 350°C auftreten um ab 200 °C konstant zu bleiben. Die Ursache: Über 350 °C ist das Aluminium noch so weich,

dass sich die Atome unter der auftretenden Kraft neu ordnen und Spannungen abgebaut werden. Diese bauen sich bei tieferen Abkühltemperaturen auf, um bei 200 °C so groß zu werden, dass das Aluminium sich plastisch verformt und dabei seine Materialeigenschaften drastisch verändert.

In der Gießereiindustrie wird die Fertigung der Zylinderlaufbuchsen vorher mit einer Software simuliert, um die Spannungen in Werkstücken aus zwei Metallen im Vorfeld zu bestimmen. Die Ergebnisse der Messungen am FRM II zeigten jedoch, dass dieses Programm einen wichtigen Faktor nicht berücksichtigte. Es berechnete die Spannungen drei Mal höher als sie tatsächlich waren.

Hochtemperatur-Werkstoffe für Gasturbinen

Für Gasturbinen gilt: Je höher die Eintrittstemperatur des Brenngases, desto höher ist der Wirkungsgrad. Wissenschaftler der Technischen Universität Braunschweig und der Technischen Universität München suchen daher nach einer neuen „Superlegierung“, die für Betriebstemperaturen bis zu 1200 °C einsetzbar ist. Dazu muss sie mehrere Voraussetzungen erfüllen: Sie muss hitzebeständig, korrosionsbeständig und mechanisch belastbar sein und sie muss große Temperaturschwankungen schadlos überstehen.

Neutronen sind hierbei die ideale Sonde zur Charakterisierung von neuentwickelten Legierungen. Die Legierungssysteme besitzen eine komplizierte Matrix, in die winzige Ausscheidungen (< 1/10000 mm) zur Verstärkung der Legierung eingelagert sind. Diese Ausscheidungen verändern sich unter Temperatureinfluss und/oder Zugbelastung durch die Rotation in einer Gasturbine. Neutronen machen diese kleinen Ausscheidungen in-situ bei hohen Temperaturen sichtbar und bestimmen sowohl Form, Größe als auch Anzahl. Diese Untersuchungen schließen beispielsweise Phasenumwandlungen und Strukturveränderungen

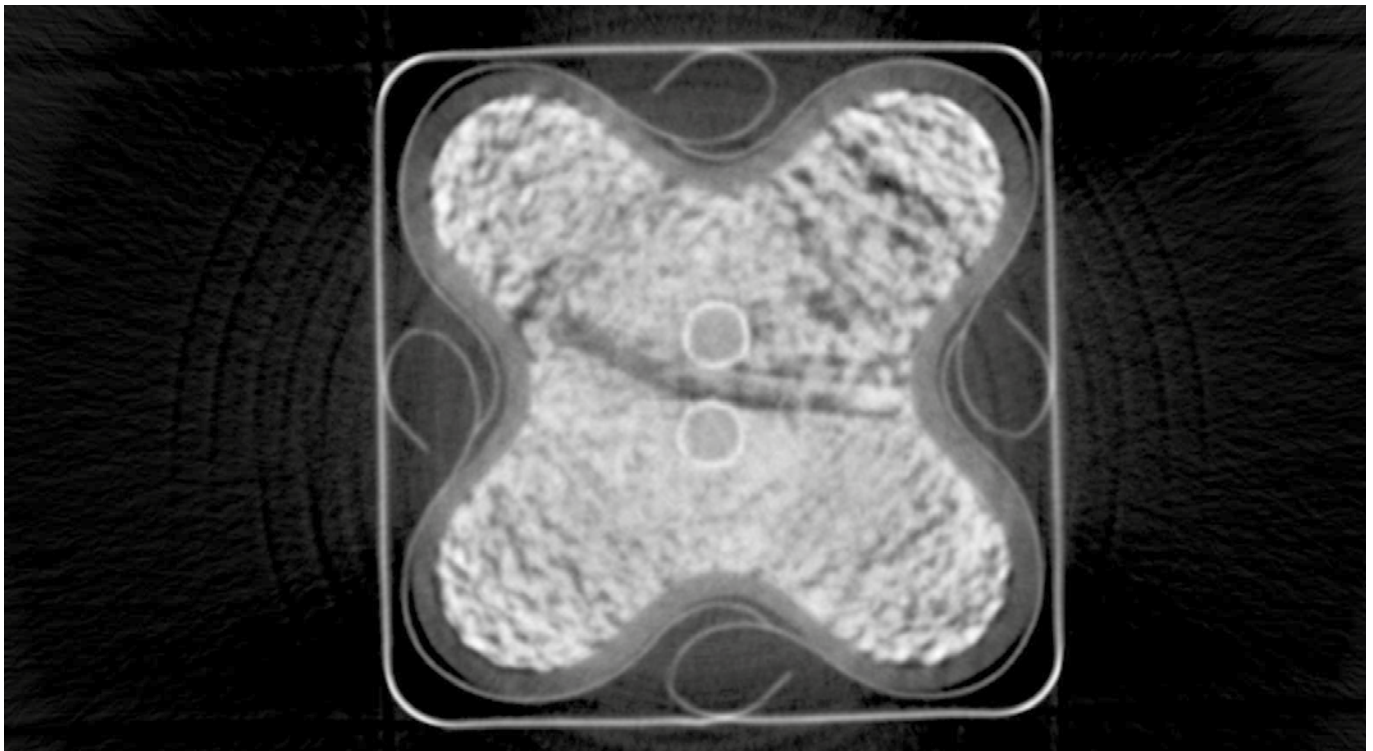
gen der Legierung ein, die nur teilweise beim Abkühlen umkehrbar sind. Genau diese Mikrostrukturänderungen wollen die Wissenschaftler verstehen, um die Entwicklung der Legierung zu verbessern. Die TU Braunschweig und die TUM setzen dabei auf ein Kobalt-Rhenium-Chrom-System mit Ausscheidungen, die im Wesentlichen aus Tantal und Kohlenstoff bestehen.

Ein Teststand am FRM II erlaubt, Legierungen nicht nur auf hohe Temperaturen aufzuheizen, sondern gleichzeitig die Fliehkräfte mit einer Zugmaschine zu simulieren. Völlig zerstörungsfrei zeigen die Neutronen das Potential dieser neuen Legierung in punkto Hitzebeständigkeit und mechanische Belastbarkeit. Eine Strukturanalyse mit Neutronen macht sichtbar, dass Chrom als alleinige Beimischung zum Kobalt und Rhenium zwar stabile Strukturen bis 1000 °C garantiert, diese Legierung bei höheren Temperaturen aber instabil wird. Das

Tantal in Form von Ausscheidungen stabilisiert die Legierung zusätzlich bis über 1200 °C, was die chemischen Elemente Kobalt und Rhenium alleine nicht garantieren können.

[Batterien beim Beladen zusehen](#)

Lithium-Ionen-Akkus werden heute in vielen tragbaren Geräten mit hohem Energiebedarf eingesetzt: Mobiltelefone, Taschenlampen, Digitalkameras und Notebooks sind nur einige Beispiele. Sie dienen aber auch in Elektroautos als Energiespeicher oder als Zwischenspeicher für Wind- oder Solarstrom. Noch haben sie jedoch Schwächen: Die Anzahl der Ladungszyklen ist nicht groß genug und die Ladung dauert oft sehr lange. Um diese Abläufe genauer zu verstehen werden die Wege des Lithiums während der Lade- und Entladevorgänge untersucht. Neutronen können die Akkus zerstörungsfrei während des Ladeprozesses durchleuch-



Die Radiografieaufnahme zeigt einen Schnitt durch ein Batteriegehäuse und die Verteilung der Reaktionsstoffe.

ten und die Prozesse im Inneren im Detail abbilden. Weil Neutronen mit Lithium stark wechselwirken, kann das Lithium neben anderen Elementen im Inneren einer Batterie gut nachgewiesen und seine Beweglichkeit direkt bestimmt werden.

Am MLZ beschäftigt sich zukünftig eine Reihe von Forschungsprojekten mit der Batterieoptimierung:

- EEBatt der Technischen Universität München (TUM) zur Entwicklung eines Batterie-Energie-Speichersystems,
- ExZellTUM der TUM, das die Herstellung von Lithium-Ionen-Akkus als Energiespeicher für Elektroautos erforscht,
- und das Projekt „Electric Fatigue in Functional Materials: „in operando“ investigation of fatigue in commercial batteries“ der Technischen Universität Darmstadt und dem Karlsruher Institut für Technologie. Letztere beobachteten etwa, dass Lithiumionen sich anders in die Graphitanode einlagern als bisher gedacht.

Qualitätssicherung im Produktionsprozess

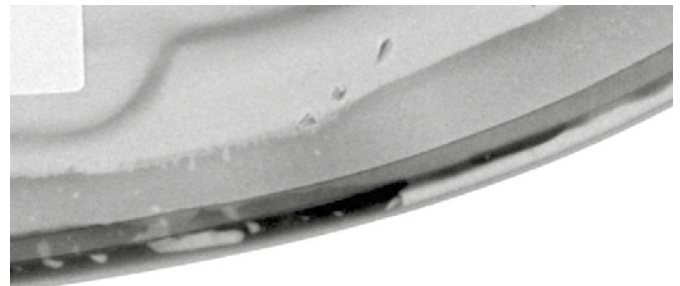
Der Automobilhersteller Ford suchte nach einer guten Methode zur Qualitätsprüfung bei der Verklebung von Komponenten in Autotüren. Dazu war insbesondere zu klären, ob für eine sichere Verbindung genug Kleber an der richtigen Stelle war. Das gesuchte Verfahren sollte zerstörungsfrei, leicht zu handhaben und kostengünstig sein. Ultraschall-, Thermographie, röntgenographische Verfahren inklusive Röntgentomographie scheinen geeignete Methoden zur Prozessüberwachung zu sein. Für einen Vergleich der Empfindlichkeit der verschiedenen Methoden wurde eine spezielle Autotür präpariert. Mittels Neutronenradiografie konnte eine Lücke in der Klebefläche in einer sehr hohen Auflösung dargestellt werden. Diese Bilder dienten als Standard für den Vergleich, um kostengünstigere und ebenfalls geeignete Methoden zu identifizieren. Thermografie erwies sich nicht als geeignet, weil sie nur sehr große Hohlräume zeigt.

Röntgenographische Verfahren kommen grundsätzlich in Frage, aber die Bauteile sind zu groß für die üblichen Geräte. Ultraschall war das bisher verwendete Verfahren, hätte aber umständlich auf Autotüren angepasst werden müssen. Im Vergleich zeigte sich, dass die Röntgen-Radiographie zwar eine sehr gute räumliche Auflösung zeigte, die Radiographie mit Neutronen aber deutlich bessere Kontraste und damit mehr Details liefert.

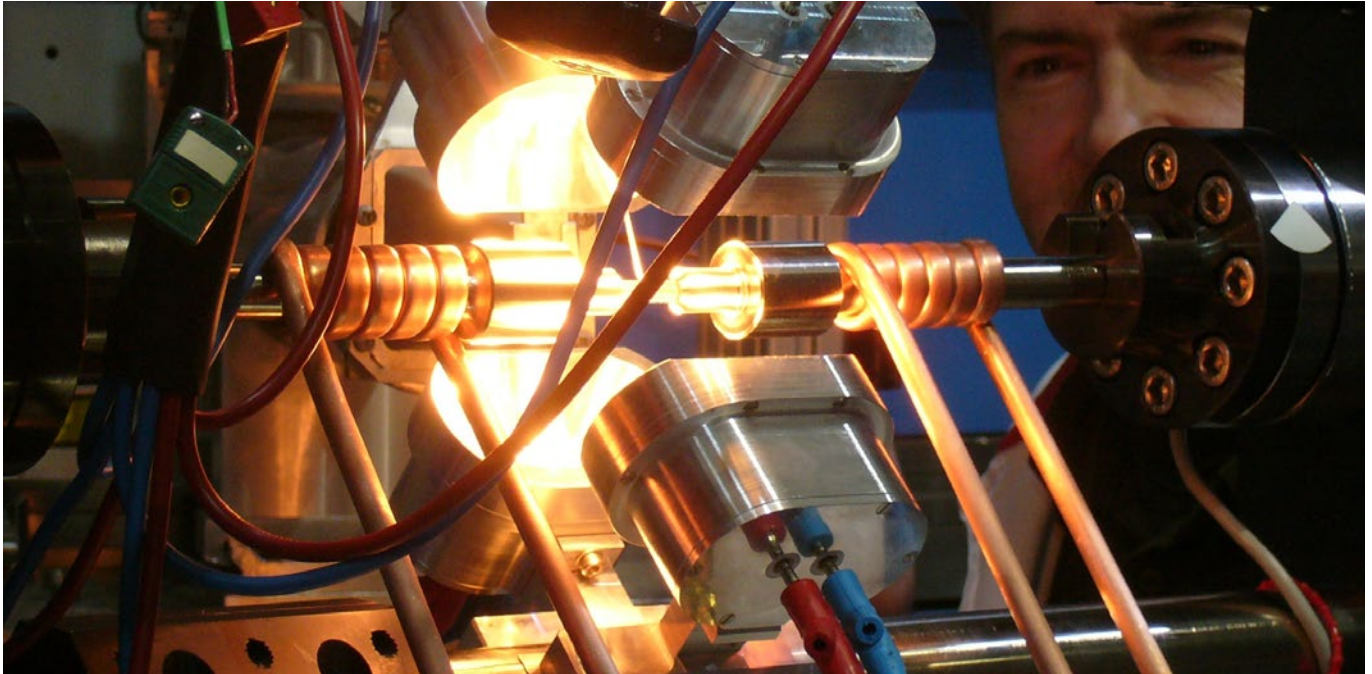
Boräquivalent als Maßgröße für Verunreinigungen

Technischer Graphit enthält meist Verunreinigungen mit anderen Elementen wie Chrom, Eisen, Nickel, Mangan, Blei und Bor, die den Verwendungszweck stark einschränken. Bei Graphit, das in kerntechnischen Anlagen eingesetzt wird, stört besonders die Verunreinigung mit Bor wegen des hohen Absorptionsquerschnitts für thermische Neutronen.

Nuklearreiner Graphit ist Graphit mit einem Reinheitsgrad, der einem so genannten Boräquivalent von weniger als 5 ppm (fünf Teile unter einer Million Teilen) entspricht, und mit einer Dichte von



Blick ins Innere einer präparierten Autotür. Mit Neutronen sind kleinste Fehler in der Verklebung sichtbar.



Zugspannungen und hohe Temperaturen werden am Instrument STRESS-SPEC für die Untersuchung von neuen Legierungen eingesetzt.

über $1,50 \text{ g/cm}^3$. Für die Bestimmung des Boräquivalents kommen sowohl die Neutronenaktivierungsanalyse (NAA) als auch die Prompte Gamma Aktivierungsanalyse (PGAA) in Frage. Die PGAA ist für die Boräquivalent-Bestimmung am besten geeignet, weil die Methode auf der Messung der Elemente mit den größten Wirkungsquerschnitten für Neutronen beruht. Genau diese Elemente aber liefern den höchsten Beitrag für das Boräquivalent. Der Kunde bekommt deshalb mit einer Multi-Element-PGAA-Analyse ein sehr umfassendes und nach Elementen selektiertes Ergebnis.

Erfahrungsaustausch und Industriekontakte

Die zerstörungsfreie Materialprüfung ist ein Thema, das seit 2006 alle zwei Jahre gemeinsam mit der VDI-Gesellschaft Materials Engineering (GME), Fachbereich 1 „Werkstofftechnik“ im VDI-TUM-Expertenforum, umfassend behandelt wird. Dabei stellen Wissenschaftler und Anwender aus der Industrie neue Methoden vor und diskutieren de-

ren Einsatzmöglichkeiten. Der VDI-Fachausschuss „Zerstörungsfreie Materialprüfung“ ist auf eine Initiative von Wissenschaftlern des MLZ entstanden und hat die Aufgabe, zerstörungsfreie Mess- und Analysemethoden zu entwickeln und Standards für Messbedingungen zu erarbeiten, die dann bei Industriekunden zur Anwendung kommen können. Der Fachausschuss befasst sich mit den Bereichen Metalle / Legierungen, Verbundwerkstoffe, Füge-technik, Filme / Oberflächen und Kunststoffe.



Dr. habil. Ralph Gilles
Industriekoordinator

Das Ziel

Bereits bei Konstruktion und Errichtung des FRM II waren neben der wissenschaftlichen Nutzung auch Anwendungen für industrielle und kommerzielle Aufgabenstellungen ganz bewusst vorgesehen worden. Neben der Erzielung von Einnahmen aus Industrienaufträgen stand von Beginn an auch der Vorteil einer engen Verzahnung von Grundlagenforschung und praktischer Anwendung im Mittelpunkt. Der daraus resultierende Erfahrungsaustausch und die gegenseitige Förderung sind bei einer zentralen wissenschaftlichen Einrichtung einer Technischen Universität unverzichtbar für die Akzeptanz in der Öffentlichkeit und bei den Industriepartnern.

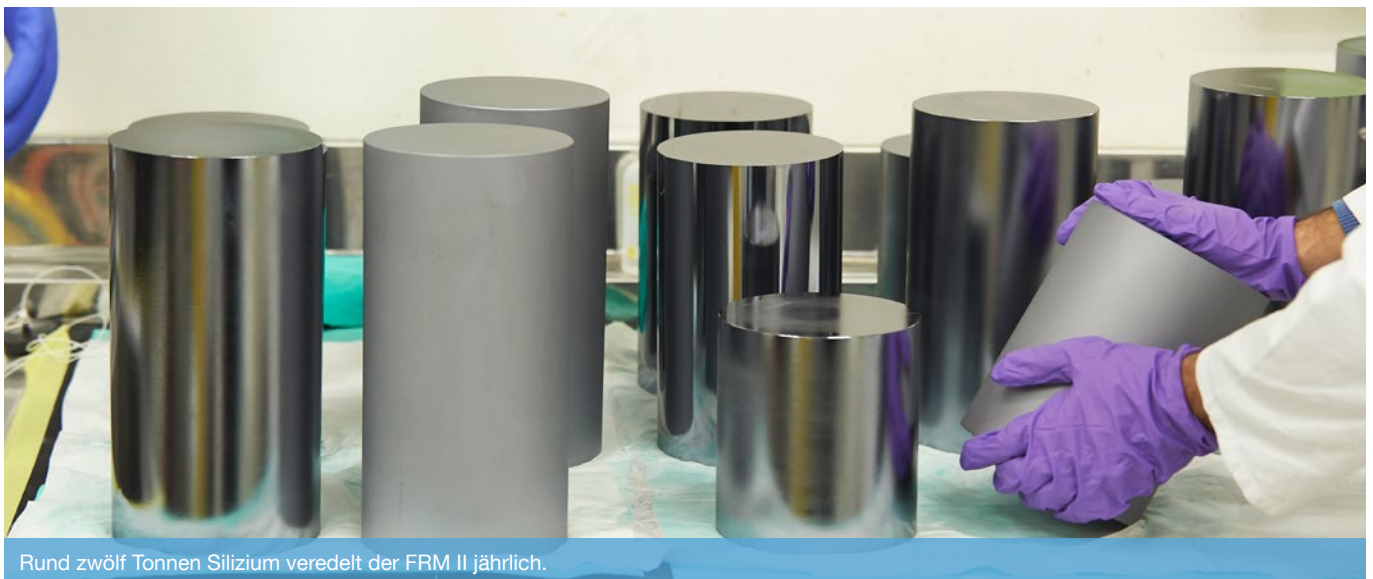
Hinreichend Neutronen für die Industrie

Als Maßstab für den Anteil der kommerziellen Nutzung hat sich die Verteilung des Neutronenflusses bewährt. Für den FRM II beträgt gegenwärtig die Verteilung etwa 30 % der Neutronen für die kommerzielle Nutzung gegenüber etwa 70 % für die Versorgung der Strahlrohrexperimente der Wis-

senschaft. Diese Verteilung variiert in Grenzen entsprechend des stufenweisen Ausbaus des FRM II. Ein wesentlicher Anteil der kommerziellen Nutzung wird durch den Teilbereich „Bestrahlungsanlagen“ erbracht, in dem gegenwärtig neun Mitarbeiter beschäftigt sind.

Der wirtschaftliche Erfolg

Grundsätzlich wird die kommerzielle Nutzung am FRM II unter Rentabilitäts Gesichtspunkten betrachtet. Dabei sind aber auch die Marktchancen der angebotenen Leistungen und die wirtschaftlichen Rahmenbedingungen der Auftraggeber zu berücksichtigen. Aus diesem Grund scheidet eine Vollkostenumlage angesichts der hohen Kosten einer Kerntechnischen Anlage aus. Vielmehr ist die Wirtschaftlichkeit unter Deckungsbeitrags Gesichtspunkten zu betrachten. Die Gegenüberstellung der Erlöse aus der kommerziellen Nutzung und der zugehörigen Einzelkosten ergibt einen deutlichen jährlichen Überschuss.



Rund zwölf Tonnen Silizium veredelt der FRM II jährlich.

Dieser Überschuss wird dem Betriebshaushalt des FRM II zugeführt und erhöht damit das verfügbare Budget.

Die Voraussetzungen

Bereits bei der Konzeption des schwerwassermoderierten Reaktors planten die Konstrukteure verschiedene Bestrahlungseinrichtungen ein. Dies betraf ganz wesentlich den Moderatortank, der sich nach innen gegen den Zentralkanal mit dem Brennelement abgrenzt und nach außen eine Barriere gegen das leichtwassergefüllte Reaktorbecken bildet. Der zylindrische Moderatortank verfügt in seiner oberen Stirnfläche über diverse Stützen zum Einbau experimenteller Einrichtungen, zu denen neben den sekundären Quellen auch die Bestrahlungseinrichtungen zählen. Alle diese Einrichtungen sind von oben zugänglich und dicht gegen das Schwerwasser des Moderatortanks verschlossen.

Ein Fingerhutrohr steht für die Siliziumdotierungsanlage zur Verfügung, ein weiteres für die Großvolumenbestrahlungsanlage. Zusätzlich verfügt der Moderatortank über zwei Einsätze für die pneumatische Standardrohrpostanlage sowie einen Einsatz für die Kapselbestrahlungsanlage, eine mit Beckenwasser betriebene hydraulische Rohrpostanlage. Zur Vorbereitung der im Aufbau befindlichen ^{99}Mo Produktion wurde vor kurzem ein weiteres Fingerhutrohr eingebaut.

Die Siliziumdotierungsanlage

Die Phosphordotierung von Siliziumkristallen durch Neutroneneinfang (NTD-Si) stellt die effektivste Methode zur Erreichung einer außerordentlich homogenen Verteilung der Phosphoratome und einer punktgenauen Einstellung des benötigten elektrischen Widerstandes im Silizium dar. Damit können



Bestückung der Siliziumdotierungsanlage.



In der Kapselbestrahlungsanlage wird radioaktives ^{177}Lu produziert, das etwa gegen Bauchspeicheldrüsenkrebs eingesetzt wird.

der Industrie die leistungsfähigsten Halbleiter zur Verfügung gestellt werden.

Die von den Auftraggebern bereitgestellten Zylinder aus Reinstsilizium unterschiedlichen Durchmessers werden in geeigneten Tragkörben in die Bestrahlungsposition gebracht. Dieser Korb wird im Fingerhutrohr in Brennelementnähe geführt, in der sie dem Neutronenfluss ausgesetzt werden. Zur Gewährleistung der notwendigen Homogenität des Dotierprofils werden die Siliziumstäbe während der

Bestrahlung um ihre zentrale Achse gedreht. Durch Einfang von Neutronen in Siliziumatomkernen erfolgt die Transmutation einzelner Siliziumatome zu Phosphor. Mit dieser Dotierung wird aus dem nicht leitenden Reinstsilizium ein veredelter Halbleiter für leistungselektronische Anwendungen. Der vom Kunden beauftragte Zielwiderstand des Siliziums bestimmt die Dauer der Bestrahlung. Entscheidendes Qualitätskriterium ist neben der genauen Einstellung des Zielwiderstands die homogene axiale und radiale Verteilung der Dotierung.

Mit einer Jahresproduktion von über zwölf Tonnen NTD-Silizium und durch die Zusammenarbeit mit einem internationalen Kundenkreis ist der FRM II führend bei dieser Form der Dotierung. NTD-Silizium wird für Hochleistungsbaulemente, insbesondere im Bereich der Fahrzeugtechnik (Hybrid-KFZ, Schienenfahrzeuge) und für den Aufbau langreichweitiger Gleichstromübertragung benötigt. Durch den Einsatz in diesen Zukunftstechnologien ist ein langfristig hoher Bedarf an NTD-Silizium zu erwarten.

Die Kapselbestrahlungsanlage (KBA)

In den beiden Strängen dieser hydraulischen Bestrahlungsrohrpost werden kleine in Aluminiumkapseln verpackte Targets in Brennelementnähe geführt und dort einem hohen Neutronenfluss ausgesetzt. Diese Bestrahlungseinrichtung wird überwiegend zur Erzeugung von radioaktiven Quellen, insbesondere für Radiopharmaka genutzt. Das gegenwärtig am FRM II am stärksten nachgefragte Isotop ist ^{177}Lu zur Diagnostik und Therapie in der Nuklearmedizin. Ein Großteil der Produktion wird

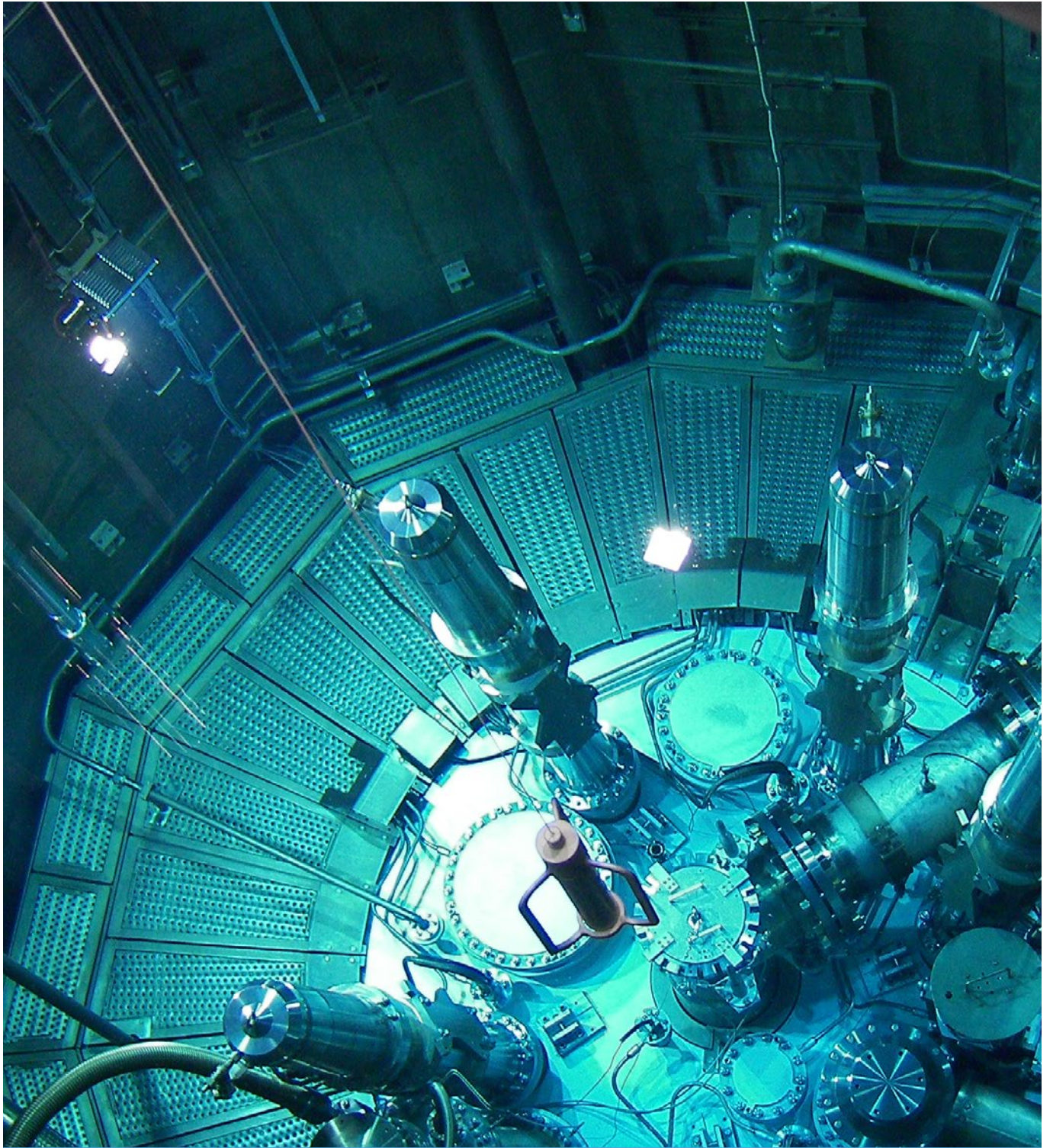
bei der auf dem Gelände des FRM II angesiedelten Firma Isotopentechnologie Garching weiterverarbeitet und reicht für die Behandlung von 50 Patienten pro Woche aus. Zudem wird in nennenswertem Umfang ^{60}Co für technische und medizinische Anwendungen produziert. An der Kapselbestrahlungsanlage überwiegt der Anteil der Langzeitbestrahlungen.

Die Standardrohrpostanlage

Im Gegensatz zur KBA liegt der Einsatzschwerpunkt der über sechs unabhängige Stränge verfügenden pneumatischen Rohrpostanlage bei Kurzzeitbestrahlungen mit moderatem Neutronenfluss. Typisches Einsatzgebiet ist die Neutronenaktivierung von Analyseproben, um einzelne Spurenelemente in der Probe mit höchster Empfindlichkeit nachzuweisen. Nach der Verpackung der Analyseproben in kleine Standardkapseln aus Polyethylen werden diese über die Rohrpoststränge zur Bestrahlung in den Moderator tank transportiert. Die Probe wird im Anschluss an die Bestrahlung gamma-spektrometrisch analysiert und die in ihr enthal-



Mit Manipulatoren können die Mitarbeiter die radioaktiven Proben hinter Bleiglas verpacken.



In der Großvolumenbestrahlungsanlage des FRM II werden hauptsächlich Mineralien bestrahlt, um ihr Alter zu bestimmen.

tenen chemischen Elemente werden anhand der charakteristischen Gammalinien identifiziert. So lassen sich beispielsweise die Reinheit von Materialien oder auch für archäologische Fragestellungen die Zusammensetzung der Glasur von Keramiken sehr genau bestimmen.

Die Großvolumenbestrahlungsanlage

Diese Anlage ist interessant für Kunden aus aller Welt mit dem Schwerpunkt der Altersbestimmung von Mineralien in geologischen Proben. Da der Betrieb dieser Bestrahlungseinrichtung nicht automatisiert ist, ist der Probendurchsatz begrenzt.

Die Qualität

Bereits im Jahr 2007 wurde die Zertifizierung nach DIN ISO 9001 für die Siliziumdotierungsanlage mit sehr gutem Erfolg bestanden. Nach mehreren erfolgreichen Wiederholungsaudits entschied die Betriebsleitung des FRM II im Jahr 2011 die Ausweitung des Zertifizierungsverfahrens nach ISO 9001:2008 auf alle Bestrahlungseinrichtungen. Auch dieses erweiterte Zertifizierungsaudit wurde auf Anhieb erfolgreich abgeschlossen.

Regelmäßige Kundenaudits bestätigen durchgängig den herausragenden Qualitätsstandard der

Bestrahlungsdienstleistungen, der auch durch die gute Platzierung in den „supplier-rankings“ verschiedener Kunden bestätigt wird.

Die Aussichten

Die bewährten und gut im Markt eingeführten Bestrahlungseinrichtungen werden auch in Zukunft uneingeschränkt ihre Bedeutung behalten. Eine nennenswerte Ausweitung der Produktion ist gerade bei der Siliziumdotierung nicht mehr möglich, da diese bereits im Zweischicht-Betrieb und unter Nutzung der Wochenenden für Langzeitbestrahlungen an der Kapazitätsgrenze betrieben wird.

Für die Zukunft ist die Etablierung der Gammabestrahlungsanlage vorgesehen, die gerade nach Inbetriebsetzung den Routinebetrieb aufgenommen hat. Mit ihr können im Abklingbecken ganzjährig unter Nutzung der Gamma-Emissionen benutzter Brennelemente Salze und andere Proben bestrahlt werden.

Eine ganz wesentliche Ausweitung der kommerziellen Nutzung ist in den kommenden Jahren durch die Aufnahme der ^{99}Mo -Produktion abzusehen, Grundlage für die Gewinnung des für die diagnostische Medizin so wichtigen Isotops $^{99\text{m}}\text{Tc}$.

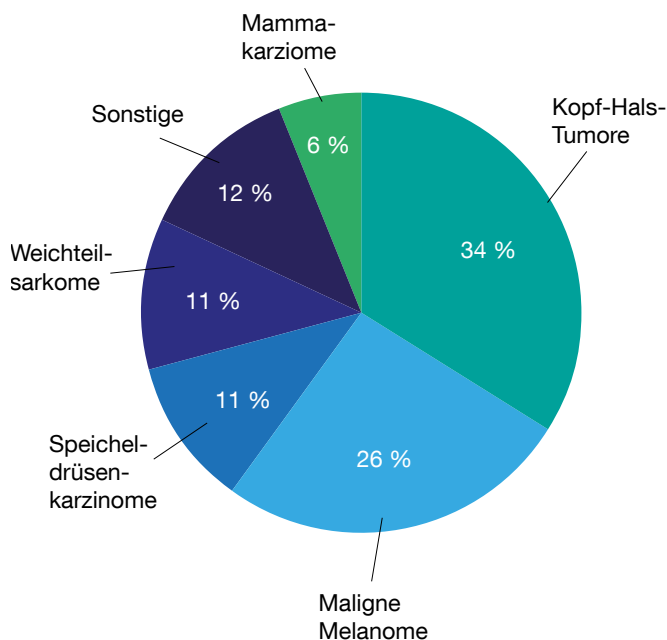


Dr. Klaus Seebach
Direktor Verwaltung



Dr. Heiko Gerstenberg
Leiter Bestrahlung

Die moderne Radioonkologie (Behandlung von Krebs durch ionisierende Strahlen) ist eine der tragenden Säulen der Krebstherapie. Etwa die Hälfte aller Krebskranken wird heute geheilt. Bei über 2/3 dieser Patienten ist die Strahlentherapie alleine (z.B. Prostatakarzinom) oder in Kombination mit Chemotherapie (z.B. Krebserkrankung des HNO-Bereiches) oder als unterstützende Behandlung mit einer Operation (z.B. brusterhaltende Therapie bei Brustkrebs) an der Heilung beteiligt. Die Strahlentherapie wird nicht nur in kurativer Absicht eingesetzt. Sie spielt auch in der palliativen Krebstherapie, d. h. bei der Linderung von Beschwerden



Im Zeitraum von 1985 bis 2000 wurden am FRM I ca. 700 Patienten (ca. 2.300 Bestrahlungen) mit Neutronen behandelt. Das Diagramm zeigt die prozentuale Verteilung in Abhängigkeit von der jeweiligen Krebserkrankung.

unheilbar Kranker, eine bedeutende Rolle. Hier kann sie eine Lebensverlängerung und eine Besserung der Lebensqualität, z.B. durch Schmerzbeseitigung oder Wiederherstellen von Körperfunktionen (Gehfähigkeit, Schlucken, etc.) bewirken.

Strahlentherapie stellt meistens, vergleichbar einem chirurgischen Eingriff, eine lokale Therapiemaßnahme dar. Eventuelle Nebenwirkungen beschränken sich daher im Wesentlichen auf die bestrahlte Körperregion, im Gegensatz zu einer systemisch wirkenden Chemotherapie. Üblicherweise werden heutzutage hochenergetische Photonenstrahlen am Linearbeschleuniger angewendet. Biologische Untersuchungen haben jedoch ergeben, dass Neutronenstrahlen in der Behandlung ganz bestimmter Krebsarten Vorteile bieten können. Neutronenstrahlen haben in der Vernichtung von Zellen eine höhere relative biologische Wirksamkeit (RBE) als hochenergetische Photonen- oder Protonenstrahlung. Bei der Wechselwirkung mit der Erbsubstanz der Zellen (DNA) führen Neutronen deutlich häufiger zu irreparablen Schäden bzw. DNA-Doppelstrangbrüchen. Diese haben den Tod der Tumorzellen zur Folge. Neutronen zeigen ferner insbesondere bei solchen Tumoren Vorteile, die schlecht mit Blut und Sauerstoff versorgt sind. Bei Behandlung mit Photonen- bzw. Röntgenstrahlen sind sauerstoffarme Tumore im Unterschied zu normal oxygenierten deutlich weniger empfindlich. Vergleichbares gilt für langsam wachsende Tumore. In der Neutronentherapie spielt der Sauerstoffeffekt keine wesentliche Rolle.

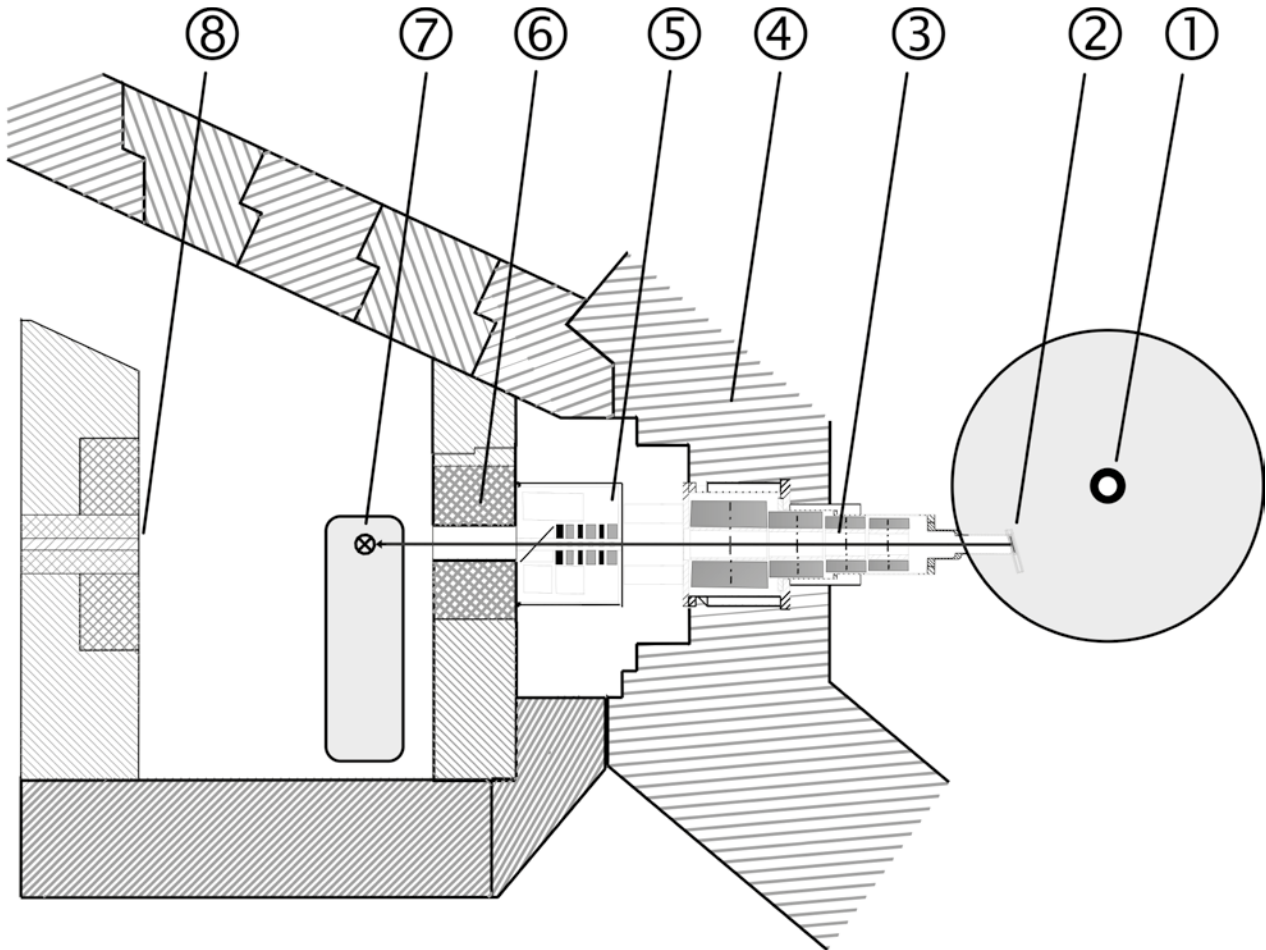
Die aufgezeigten Eigenschaften der Neutronenstrahlen führten vor mehr als 30 Jahren den damaligen Leiter der Reaktorstation Prof. L. Koester und den Radioonkologen Prof. A. Breit dazu eine Neutronenbestrahlungsanlage am FRM I (Forschungsreaktor München) zu installieren. Kernstück der Anlage war ein Neutronenkonverter, der die ther-

¹ Klinik und Poliklinik für Strahlentherapie und Radiologische Onkologie, Klinikum rechts der Isar, TUM

² Forschungsneutronenquelle Heinz Maier-Leibnitz (FRM II), TUM

³ Abteilung Strahlentherapie und Radioonkologie, Klinikum Traunstein

⁴ Universitätsklinik für Strahlentherapie-Radioonkologie Innsbruck



Grundriss der Neutronentherapieanlage MEDAPP am FRM II: 1 Reaktorkern, 2 Neutronenkonverter, 3 Strahlrohr mit Verschlüssen, 4 Beckenwand, 5 Filtereinheit, 6 Lamellenkollimator, 7 Bestrahlungstisch, 8 Strahlfänger

mischen Neutronen in einer Platte aus hochangereichertem Uran in schnelle Neutronen, die bei der Kernspaltung entstehen, umwandelt. Diese schnellen Neutronen wurden nach Kollimierung für die Neutronentherapie eingesetzt. Mithilfe einer solchen „Strahlrohr-Konverteranlage“ wurden bis zum Jahr 2000 am FRM I ca. 700 Patienten bestrahlt.

Bei der Errichtung des FRM II wurde die Neutronentherapieanlage wesentlich verbessert. Der heute verfügbare Neutronenstrahl hat eine hö-

here Dosisleistung, so dass die Bestrahlungszeiten deutlich reduziert werden konnten. Es wurde der Strahlquerschnitt stark vergrößert und ein Multi-Leaf-Kollimator erlaubt die Anpassung der Form und Größe des Strahlenfeldes an die zu bestrahlende Tumorregion.

Aufgrund ihres Energiespektrums haben die am FRM II erzeugten Neutronen die höchste biologische Wirksamkeit aller derzeit zur Krebsbehandlung zur Verfügung stehenden Neutronenstrahlen.

Jedoch ist ihre therapeutische Anwendung aufgrund ihrer relativ niedrigen Energie (mittlere Energie von 1,9 MeV) und der daraus folgenden begrenzten Eindringtiefe auf oberflächennahe Tumoren beschränkt. In 5 cm Tiefe stehen nur noch 50 Prozent der Dosisleistung im Vergleich zur Körperoberfläche zur Verfügung. Zurzeit ist die FRM II-Anlage die weltweit einzige ihrer Art.

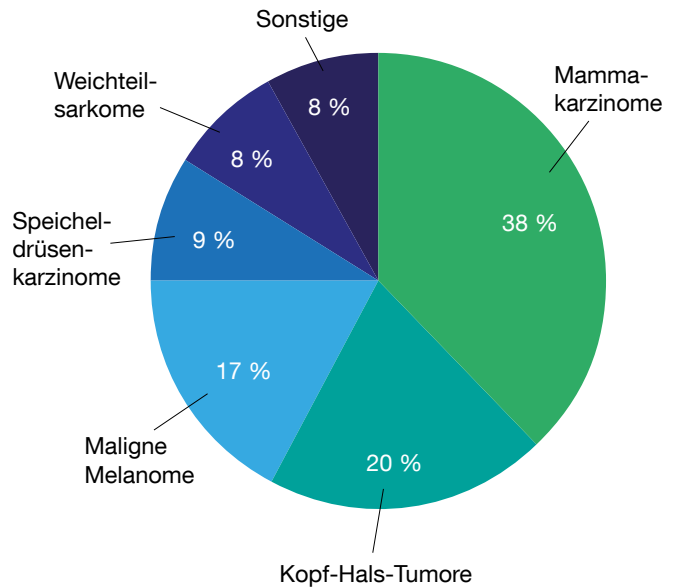
Seit 2007 wird die Neutronentherapieanlage am FRM II klinisch eingesetzt. Bislang wurden am FRM II mehr Patientinnen mit Thoraxwand-Rezidiven von Mammakarzinomen bestrahlt als früher am FRM I. Die Zahl der Patienten mit malignen Melanomen hat abgenommen.

Klinisch wissenschaftliche Studien haben gezeigt, dass bei kurativen Behandlungen insbesondere Patienten mit Tumoren der Speicheldrüsen von einer Neutronentherapie profitieren können. Es wurde beobachtet, dass Neutronen speziell bei dieser Art von Tumoren das Risiko eines lokalen Rezidivs (Rückfalls) deutlich mindern. Erst vor kurzem wurde dieses in einer großen Untersuchung an über 400 mit Neutronen behandelten Patienten bestätigt.

[C. Stannard et al., Malignant salivary gland tumours: can fast neutron

therapy results point the way to carbon ion therapy? Radiother Oncol, 109, 262 (2013)]

Teilweise wurde die Neutronentherapie mit einer konventionellen Photonenstrahlung kombiniert. Im Rahmen eines individuellen Heilversuches konnten wir bei einer anderen Krebserkrankung im



Prozentuale Verteilung der Patienten bei Neutronentherapie am FRM II in Abhängigkeit von der jeweiligen Krebserkrankung.



Dreidimensional verfahrbarer, motorisierter Bestrahlungstisch.

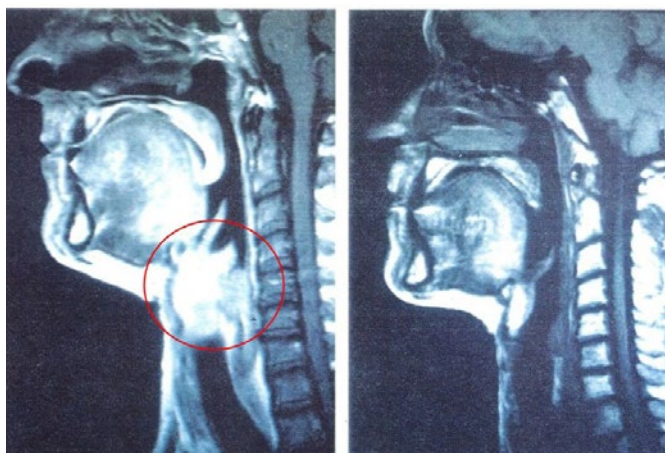
HNO-Bereich ein Kehlkopfkarcinom mit einer Neutronentherapie zur vollständigen Rückbildung und Heilung bringen.

Nicht nur in der Kuration sondern auch in der Palliation werden beachtliche Erfolge erzielt durch Linderung von Schmerzen oder Symptomen, teilweise auch durch langfristig anhaltende lokale Tumorkontrollen. Dieses trifft insbesondere für Brustkrebs-Hautmetastasen an der Brustwand zu. Bei einem kleinen Teil von Patientinnen mit Brustkrebs sieht man, zumeist nach einem langen Leidensweg mit Brustamputation und einer langjährigen Abfolge von weiteren Therapiemaßnahmen inklusive Chemotherapie, dass sich die Erkrankung nach und nach in Form von Knötchen an der Brustwand

ausbreitet. Hier können wir speziell bei sogenannten „ausbehandelten“ Patientinnen durch die Neutronentherapie Rückbildungen erzielen und die individuelle Lebensqualität verbessern. Die Nebenwirkungen bestehen im Wesentlichen in einer zeitweisen Entzündung mit Rötung und Überwärmung der Haut. Diese „Dermatitis“ heilt nach Ende der Strahlenbehandlung nach und nach ab.

Auch bei Patienten mit malignen Melanomen (schwarzer Hautkrebs) konnten wir im Sinne der Palliation unter Verwendung von Neutronen gute Ergebnisse beobachten. Melanome gelten als eher strahlenresistent bei Verwendung von Photonen (Röntgenstrahlen). Auf Neutronen reagieren sie wesentlich empfindlicher. Die biologischen Gründe, die hier im Spiele sind, wurden oben diskutiert. In einer früheren Publikation konnten wir zeigen, dass mit relativ geringen Neutronen-Dosen eine effiziente und gut tolerierbare palliative Therapie durchgeführt werden kann. Kleinere Melanom-Knoten ($\leq 6 \text{ cm}^3$) bildeten sich vollständig zurück

[M. Bremer et al., Palliative radiotherapy of malignant melanoma with reactor fission neutron therapy (RENT): a prospective study. *Radiat Oncol Investi*, 7, 188 (1999)]



Computertomographie eines Patienten mit einem ausgedehnten Tumor der Kehlkopfregion. Das linke Bild zeigt den Ausgangsbefund (roter Kreis), im rechten Bild ist ca. 2 Jahre nach erfolgter kombinierter Photonen- und Neutronentherapie kein Resttumor nachweisbar.

Zusammengefasst stellen Neutronen am FRM II bei richtiger Indikationsstellung eine gute palliative, bei einer kleinen Zahl von Patienten auch sinnvolle kurative Form der Strahlentherapie dar. In unserer klinischen Praxis bringen wir die Neutronen bei strahlenresistenten (resistent gegenüber Photonen) und eher ausbehandelten Karzinomerkrankungen der Körperoberfläche, speziell auch Metastasen zur Anwendung. Tiefer im Körper liegende Tumore lassen sich am FRM II auf Grund der limitierten Eindringtiefe der dort verfügbaren Neutronen nicht behandeln. Die in der Neutronentherapie gewonnenen Erkenntnisse kommen längerfristig auch der Entwicklung neuer, innovativer Bestrahlungsanlagen zur Schwerionentherapie zu Gute. Entsprechende interdisziplinäre Forschungen von Physikern und



Älterer Patienten mit einem ausgedehnten, blutenden Melanom der Kopfhaut. Links vor, rechts nach der Therapie.

Strahlenmedizinern werden unter Mitbeteiligung der Klinik für Strahlentherapie und Radiologische Onkologie der TU München (Klinikum rechts der Isar) im Rahmen des DFG Exzellenzclusters „Munich Centre for Advanced Photonics“ betrieben. Schwerionen (z.B. Kohlenstoff) lassen sich bezüglich der hohen biologischen Wirkung bei der Vernichtung von Tumor- bzw. Krebszellen mit Neutronen vergleichen. Im Hinblick auf die Dosisverteilung im Tumorgebiet haben sie Vorteile gegenüber Neutronen, vor allem bei tiefer im Körper lokalisierten Tumoren.



Prof. Dr. Klaus Schreckenbach † 2013
Technischer Direktor des FRM II von 1999 bis 2005



Gert von Hassel † 2009
Presse- und Öffentlichkeitsarbeit am FRM II von 1994 bis 2002



Guido Engelke † 2008
Projektsteuerer FRM II von 1994 bis 2001,
Verwaltungsdirektor des FRM II von 2002 bis 2006



Jürgen Didier † 2004
Projektleiter Framatom / ANP von 1994 bis 2002

Herausgeber

Forschungs-Neutronenquelle
Heinz Maier-Leibnitz (FRM II)
Technische Universität München
Lichtenbergstraße 1
85748 Garching
Telefon: 089.289.14966
Fax: 089.289.14995
E Mail: frm2@frm2.tum.de

Redaktion

Dr. Anton Kastenmüller,	FRM II / TUM
Christine Kortenbruck,	FRM II / TUM
Andrea Voit,	FRM II / TUM

Layout und Satz

Ramona Bucher,	FRM II / TUM
----------------	--------------

Bildnachweis

TUM:
Seite 3, 32 Mitte

Wenzel Schürmann, TUM:
Seite 5, 10 unten, 29, 36, 37 rechts, 39 oben, 58,
59, 60, 61, 69 (2 Bilder oben)

Andreas Heddergott / Astrid Eckert, TUM:
Seite 6, 25 rechts, 31, 46, 48 unten, 63 links

Volker Lannert, DAAD:
Seite 41, 43, 45

Bayerisches Staatsministerium für Bildung und
Kultus, Wissenschaft und Kunst:
Seite 4, 32 oben

FRM II / TUM:
Seite 11, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 21, 22, 23, 24,
25 (links), 27, 33, 34, 35, 37 links, 38, 39 unten, 48
oben, 51, 53, 55, 56, 57, 62, 63 rechts, 65, 66, 67

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Bayerisches Staatsministerium für
Bildung und Kultus, Wissenschaft und Kunst



