



Impressum

Herausgeber:

Technische Universität München
Forschungs-Neutronenquelle
Heinz Maier-Leibnitz (FRM II)
Lichtenbergstr. 1
85747 Garching/Germany
Tel: +49.89.289.149.66
Fax: +49.89.289.149.95
E-Mail: frm2@frm2.tum.de
www.frm2.tum.de

Direktorium:

Wissenschaftlicher Direktor:
Prof. Dr. Winfried Petry
Technischer Direktor:
Dr. Ingo Neuhaus
Verwaltungsdirektor:
Dr. Klaus Seebach

Redaktion:

Gert von Hassel, Institut für
Wirtschaftskommunikation
E-Mail: info@ifwk.de
Kurz bevor diese Broschüre
gedruckt wurde, verstarb
Gert von Hassel völlig unerwartet.
Der Verlust für den FRM II ist
immens.

Redaktion TUM:

Dr. Ina Lommatzsch
Dr. Jürgen Neuhaus
Dipl.-Biol. Andrea Voit

Gestaltung:

Bernd R. Maier, Konzept & Design,
Chieming

Druckvorstufe:

Michael Gruber, Teisendorf

Computergrafik:

Dieter Günter, München
Franz Tralmer, TUM, Seite 24/25

Fotonachweis:

Ulla Baumgart, Seite 30/31

Bayerisches Staatsministerium
für Wissenschaft, Forschung und
Kunst, Seite 8

Dipl.-Biol. Manfred Coilling, S. 75
(rechts)

Deutsches Zentrum für Luft- und
Raumfahrt, S. 44

Getty Images, Seite 16

Gert von Hassel, IfWK, Seite 6/7,
14/15, 22, 33 (unten), 38/39, 41,
49, 50, 51, 64/65, 71 (rechts),
72/73, 74 (links), 75 (oben),
80/81, 84/85

Jülich Centre for Neutron Science,
Seite 52

Dr. Jürgen Neuhaus, Seite 19

Wenzel Schürmann, TUM, Seite
12/13, 17, 21, 24/25 (alle), 27, 29,
33 (oben) 37, 45, 47, 53, 55, 59, 60
(Nr. 1 bis 7), 62 (beide), 63, 66, 70,
77 (beide), 79

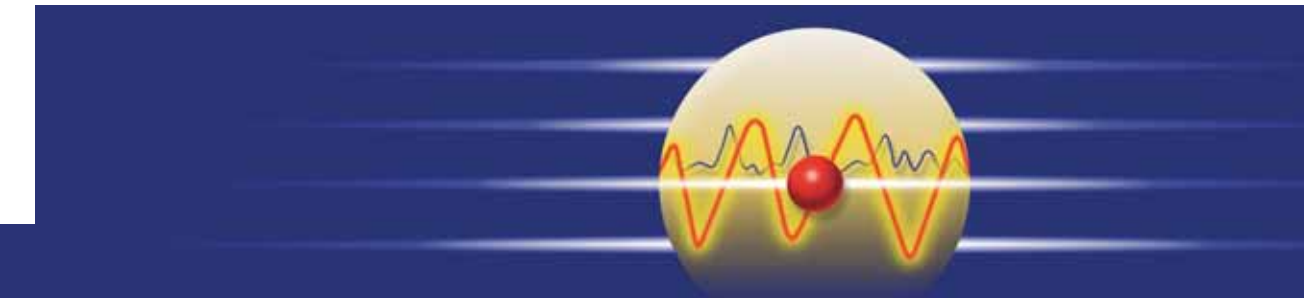
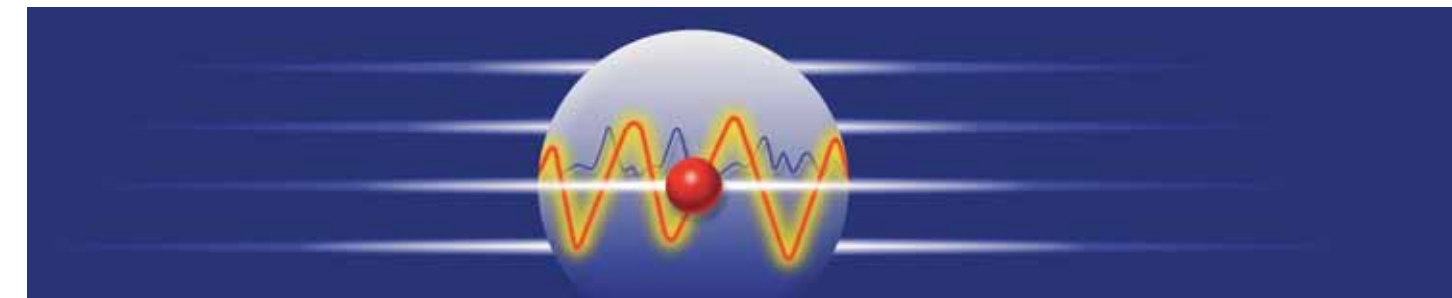
Alle anderen
Technische Universität München

Druck:

creo Druck und Medienservice,
Bamberg, gedruckt auf chlorfrei
gebleichtem Papier

Stand:

Juni 2009



Forschung mit Neutronen

Methoden entwickeln, Natur befragen, Antworten bekommen.

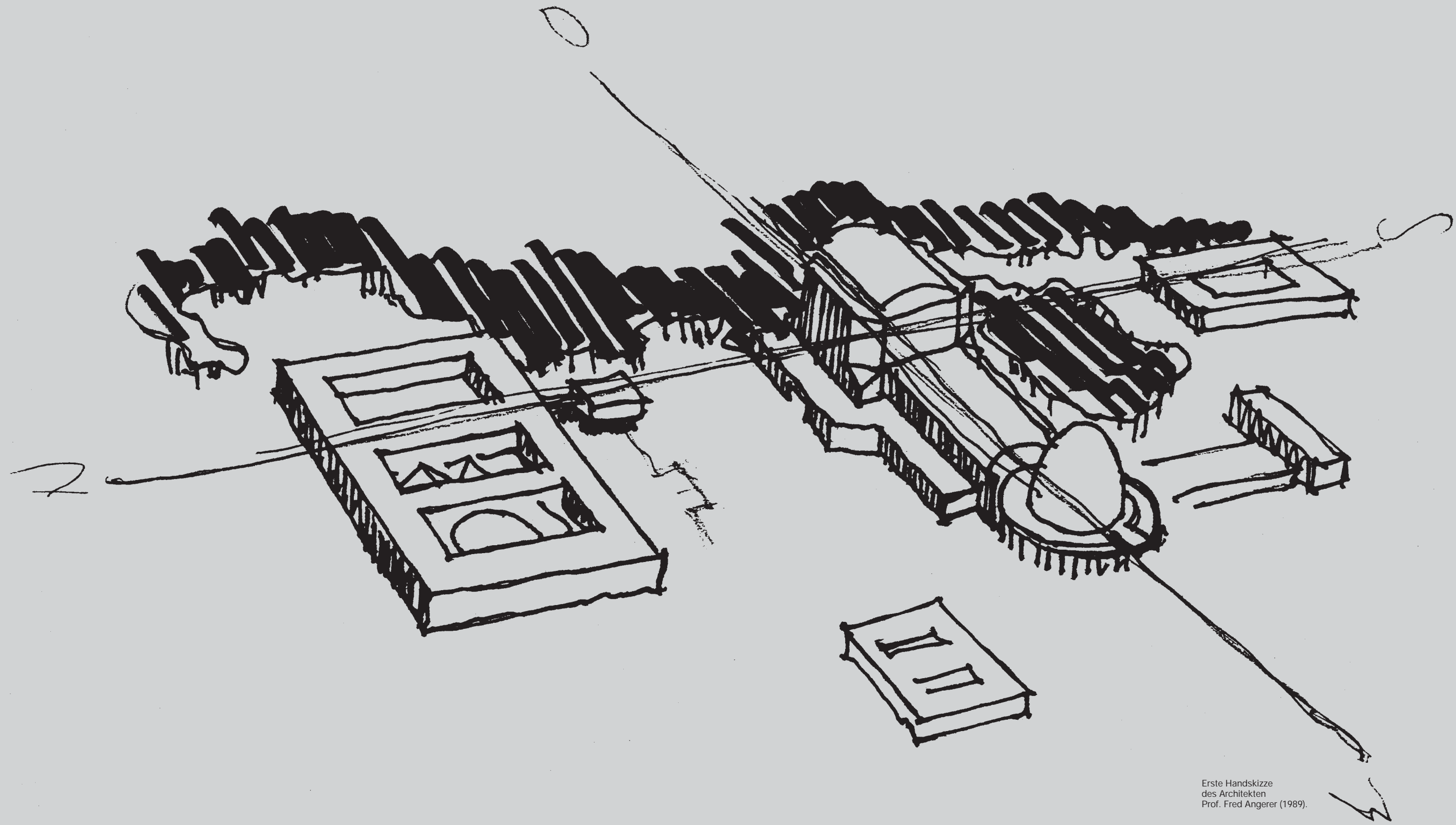
1	Prolog	6 bis 13
	Staatsminister Dr. Wolfgang Heubisch	8
	TUM Präsident Prof. Dr. Dr. h.c. mult. Wolfgang A. Herrmann	10
	Der FRM II: Wie aus dem Ei gepellt	12

2	Die Anlage	14 bis 37
	Das Neutron	16
	Einzigartige Eigenschaften · Magnetisches Moment · Neutronenbeugung · Geschwindigkeit der Neutronen · Neutronenleiter · Kontrastreicht · Vielfältige Anwendungen	

	Die Neutronenquelle	18
	Wie Neutronen frei werden · Brennelement · Reaktorbecken · Reaktorzyklus · Sekundäre Quellen · Auf dem Weg zu den Experimentierplätzen · Brennstoff im Griff · Sicherheit bis ins Detail · Sicherheit durch Naturgesetze · <i>Exkurs: Hoch angereichertes Uran (HEU) als Brennstoff</i> · Aktive Sicherheit · Kühlkreislauf · Schutz vor Einflüssen von außen · <i>Exkurs: Kategorien von Störfällen</i>	

	Der Strahlenschutz	36
	Überwachung der Emissionen · Höchste Sicherheit für Personen · <i>Exkurs: Der Wetterbeobachtungsmast</i>	

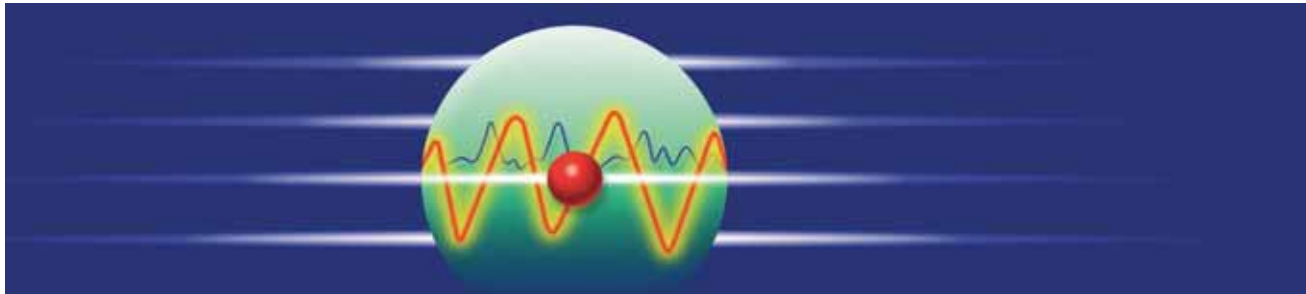
3	Die Nutzung der Neutronen	38 bis 63
	Grundlagenforschung mit Neutronen	40
	Das Neutron als Forschungsobjekt · Materialeigenschaften verstehen · Wasserstoff speichern · <i>Exkurs: Wo welches Atom sitzt</i> · <i>Exkurs: Wie sich Atome bewegen</i> · Dynamik in der Schmelze · Supraleitung unter der Lupe · Magnetismus in Isolatoren und Metallen · Positronen finden Fehler · Ein Blick in die Vergangenheit	



Erste Handskizze
des Architekten
Prof. Fred Angerer (1989).



Luftaufnahme vom Campus
Garching (vorne), Stadt Garching
(mitte) und das nördliche München.



3	Großforschungszentren am FRM II 50
	Weiche Materie im Fokus · Plastik in Bewegung · Waschmittel sparen · Zur Salzsäule erstarrt · <i>Exkurs: Blick in die Nanowelt</i> · Zellmembranen selbst gemacht
	Von der Forschung zur industriellen Anwendung 58
	Innenansichten in 3D · <i>Exkurs: Mit Neutronen durchleuchtet</i> · Materialentwicklung für die Technik · Die Nadel im Heuhaufen · Innere Spannungen · Wie Phosphor ins Silizium kommt
4	Neutronen in der Medizin 64 bis 71
	Mit Neutronenstrahlen gegen Tumoren 66
	Radiopharmaka vom FRM II 70
5	Rund um den FRM II 72 bis 79
	Aktiv für den Umweltschutz 74
	Wir über uns 76
	Attraktiv für Wissenschaftler · Besucherandrang täglich
	Kunstlicht 78
6	Ein Blick in die Zukunft 80 bis 83
	Urknall · Radiopharmaka · Neue Südhalle · Wissenschaftliche Kooperation · Synergien: Spallations- und Reaktorquellen · Neuen Brennstoff entwickeln · Ausbildung in der Kerntechnik
7	Anhang 84 bis 93
	Glossar 86
	Partner: Universitäten und Institute 90
	Institute der Technischen Universität München 91
	Impressum 93

Turbinenschaufel, die mit Neutronen auf innere Spannungen untersucht wird.



Sehr geehrte Damen und Herren,
liebe interessierte Leserinnen und Leser,



Dr. Wolfgang Heubisch
Bayerischer Staatsminister
für Wissenschaft, Forschung
und Kunst

Garching steht seit einem halben Jahrhundert für innovative Wissenschaft und exzellente Forschung mit Neutronen. Der Bau des so genannten „Atom-Eis“ bedeutete einen Meilenstein für Bayern – vom Agrarstaat hin zu dem High-Tech-Standort von heute.

Die Bayerische Staatsregierung hat mit der Errichtung und dem Betrieb der Forschungs-Neutronenquelle Heinz Maier-Leibnitz, kurz dem FRM II, konsequent die Erfolgsgeschichte der Neutronenforschung an der Technischen Universität München fortgeschrieben. Heute ist die TU München unbestritten eines der führenden Exzellenzzentren in der deutschen Wissenschafts- und Forschungslandschaft. Mit dem „Campus Garching“ hat sich ein Kompetenz-Cluster der Natur- und Ingenieurwissenschaften im Norden Münchens entwickelt, der keinen Vergleich mit den besten Standorten weltweit zu scheuen braucht.

Bayern hält an dem Ziel fest, seinen Platz unter den innovativsten Regionen weltweit zu sichern und konsequent auszubauen. Dazu brauchen wir exzellente Spitzenforschung mit Neutronen, wie sie am FRM II möglich ist, ebenso, wie die schnelle Umsetzung von Forschungsergebnissen in wirtschaftlich nutzbare Anwendungen. Garching ist weltweit zu einem Magnet für Unternehmen geworden, die grundlegende Ergebnisse und Erkenntnisse, die bei der Forschung mit Neutronen gewonnen wurden, zu unserer aller Nutzen für neue Produkte, bei der Optimierung von Produktionsprozessen oder zur Produktsicherheit einsetzen. Neutronen helfen, Krankheiten zu erkennen und zu heilen sowie körperliche Leiden zu lindern. Das Potential, das auf so vielen unterschiedlichen Gebieten in der Forschung mit Neutronen liegt, bietet ungeheure Chancen, die Bayern nicht ungenutzt lassen wird.



Die Bayerische Staatsregierung steht dazu, dass die Forschung mit und die Anwendung von Neutronen auch in Zukunft einen festen Platz in der bayerischen Forschungslandschaft haben muss und haben wird.

Zugleich wird deutlich, wie stark eine Spitzenforschungseinrichtung, wie der FRM II, in ein Netzwerk mit anderen deutschen Hochschulen und Forschungsinstituten eingebunden ist. Dies zeigt sich beim Aufbau und Betrieb der wissenschaftlichen Nutzung als Serviceeinrichtung für Forscher aus der gesamten Bundesrepublik.

Spitzenforschung macht jedoch an den Landesgrenzen nicht halt. Innerhalb einer Gemeinschaft europäischer Großforschungszentren für die Nutzung von Neutronenstrahlen fördert die Europäische Union den Zugang von ausländischen Wissenschaftlern zum FRM II. Bayern hat so mit der Forschungs-Neutronenquelle Heinz Maier-Leibnitz eine herausragende Forschungsinfrastruktur innerhalb Deutschlands, Europas und der Welt geschaffen.

Es freut mich, dass die Technische Universität mit der vorliegenden Broschüre Laien wie Fachleuten gleichermaßen einen Blick in die faszinierende Welt der Neutronenforschung gewährt und umfassend über die derzeitigen Anwendungsmöglichkeiten informiert.

Ich wünsche Ihnen eine anregende und informative Lektüre dieser Broschüre!

Mit freundlichen Grüßen
Ihr

Dr. Wolfgang Heubisch, Staatsminister
Bayerisches Staatsministerium für Wissenschaft, Forschung und Kunst



Neutronen sind Licht!



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

Unter diesem Motto, das gleichzeitig Programm ist, habe ich am 9. Juni 2005 gemeinsam mit den Repräsentanten der Bayerischen Staatsregierung die neue Forschungs-Neutronenquelle Heinz Maier-Leibnitz (FRM II) ihrer Bestimmung übergeben. Eine mutige, beherzte Landespolitik, unterstützt durch die Bundesregierung, hatte ihren wesentlichen Anteil daran, dass den Akteuren der Technischen Universität München Freude und Faszination an der Planung, dem Bau und schließlich der Inbetriebnahme der Hochleistungsneutronenquelle „Made in Germany“ nie verloren ging – trotz umfangreicher, mühseliger Genehmigungsprozeduren. Das legendäre „Atom-Ei“, jahrzehntelang Symbol und Markenzeichen für den Wiedereintritt der deutschen Wissenschaft in die internationale Gemeinschaft, hatte seinen Nachfolger gefunden.

Um die neue Forschungs-Neutronenquelle gruppieren sich heute ein Großteil der Fakultäten unserer Universität, mehrere Max Planck-Institute, das European Southern Observatory (ESO), das Europäische Forschungszentrum von General Electric, das Leibniz-Rechenzentrum der Bayerischen Akademie der Wissenschaften und bald auch neue Institute der Fraunhofer-Gesellschaft. Garching hat einen wissenschaftlichen Nimbus erreicht, den es nun in die Zukunft zu verstetigen gilt. Bayern und die Technische Universität München sind stolz auf Garching.

Nach gut fünf Jahren seit der Inbetriebnahme des 435 Mio. Euro-Projekts erleben wir einen wissenschaftlichen Andrang, der die Forschungskapazitäten um mehr als das Doppelte übersteigt. Der FRM II ist weltweit führend, was die nutzbare Neutronendichte im Vergleich zur thermischen Leistung und was die Anwendungsvielfalt betrifft. Wir verfügen über ein einmalig breites Neutronenspektrum, von ganz langsamen bis zu sehr schnellen Neutronen – daraus resultieren unübertroffene Einsatzmöglichkeiten, von der Materialforschung über die Herstellung von homogen dotiertem Halbleitersilizium bis zur medizinischen Therapie. Möglich ist das nur durch das starke Engagement von Forschergruppen aus ganz Deutschland, allen voran die Helmholtz-Gemeinschaft, die Max Planck-Gesellschaft sowie zahlreiche Universitäten.

Die Forschungs-Neutronenquelle Heinz Maier-Leibnitz ist eine Zentrale Wissenschaftliche Einrichtung der Technischen Universität München. Als solche vernetzt sie praktisch alle Fakultäten miteinander und ist der stärkste Brückenkopf zwischen den Natur- und Ingenieurwissenschaften, den Lebenswissenschaften und der Medizin. So war der FRM II nicht



ohne Einfluss auf den Erfolg unserer Universität in der Exzellenzinitiative 2006. Hierfür steht beispielhaft der TUM-geführte Forschungsexzellenzcluster „Origin and Structure of the Universe“, der den Ursprung und die Struktur des Universums erforscht und hierfür eine Quelle für ultrakalte Neutronen nutzt. Neben der Grundlagenforschung setzt der FRM II aber auch auf die angewandte Forschung und Industrieprojekte. Künftig soll sie der wichtigste Lieferant von medizinrelevanten Isotopen (z.B. Molybdän-99) in Europa werden. Also werden wir dem traditionsreichen Lehrstuhl für Radiochemie eine moderne medizinisch-pharmazeutische Neuausrichtung geben – die Neutronenquelle verpflichtet dazu!

Nicht zu vernachlässigen ist, dass der FRM II wesentlich zur studentischen Ausbildung und zu deren Attraktivität beiträgt. Über Vorlesungs-, Praktikumsveranstaltungen und Sommerschulen hinaus bietet der FRM II exzellente Arbeitsbedingungen in der fachspezifischen und interdisziplinären Qualifizierung. So wurden von den 733 Experimenten im Jahr 2008 am FRM II weit mehr als die Hälfte von diesen Nachwuchswissenschaftlern durchgeführt. Entsprechend groß ist die Nachfrage seitens der jungen Forscherinnen und Forscher.

Die Technische Universität München ist einerseits stolz, eine Großforschungseinrichtung dieses Kalibers betreiben zu können. Sie sieht sich andererseits in der ständigen Herausforderung, den wissenschaftlichen Fortschritt in harter internationaler Konkurrenz nicht nur zu begleiten, sondern seine Standards zu definieren. Dabei können wir auf ein hervorragendes Fachkollegium setzen, dem ich an dieser Stelle meinen respektvollen Dank für die exquisiten Leistungen ausspreche, aus denen sich die Großinvestition FRM II erst rechtfertigt. Neben den Wissenschaftlern gilt mein Dank auch dem Betriebspersonal für die minutiöse, kompromisslose Einhaltung jener Sicherheitsstandards, mit denen wir beim FRM II internationale Maßstäbe gesetzt haben. Forschungsqualität und Betriebssicherheit gehören bei einem nuklear-technischen Forschungsinstrument untrennbar zusammen. Wir halten, was wir versprochen haben.

Wolfgang A. Herrmann
Präsident
Technische Universität München



Der FRM II: Wie aus dem Ei gepellt

Der Namensgeber des FRM II und langjährige Präsident der Deutschen Forschungsgemeinschaft, Prof. Dr. Heinz Maier-Leibnitz, hat die Vorgehensweise der Naturwissenschaften einmal so beschrieben: „Neue Methoden entwickeln, damit die Natur befragen und Antworten bekommen.“

Es ist kein Zufall, dass Heinz Maier-Leibnitz (1911 – 2000) Zeit seines Lebens von Neutronen fasziniert war. Die Einsatzmöglichkeiten von Neutronen in unterschiedlichen Bereichen sind vielfältig, sie werfen neue Fragen auf und geben aufschlussreiche Antworten. Darüber gibt diese Broschüre Auskunft: Über die Forschungs-Neutronenquelle Heinz Maier-Leibnitz (kurz FRM II) und die Arbeit der Wissenschaftler, über die Sicherheit der Anlage, über die faszinierenden Anwendungen der Neutronen heute und die Visionen der Forscher für morgen.

Denn die Forschung mit Neutronen und deren Anwendung verhilft uns zu Erkenntnissen, die mit kaum einer anderen Methode gewonnen werden können. Sie sind ein wichtiges Werkzeug für die Physik, die Chemie, die Geologie, die Material- und Ingenieurwissenschaften, ebenso wie für die Medizin und die Biologie sowie für die Erhaltung unseres kulturellen Erbes. Neutronen können Leiden



Prof. Dr. Heinz Maier-Leibnitz vor dem von ihm erbauten und geleiteten Atom-Ei.

lindern und Krankheiten bekämpfen. Mit ihrer Hilfe werden gebräuchliche Materialien erforscht und verbessert. Neue, bisher unbekannte Materialien werden entwickelt und erprobt. Darüber hinaus sind Experimente mit ihnen ein Schlüssel zum Verständnis der elementaren Kräfte der Natur. Neutronen erschließen uns die Zukunft!

Seit mehr als einem halben Jahrhundert nutzen Wissenschaftler an der Technischen Universität München (TUM) in Garching Neutronen. Sie erhalten so Einblicke in Strukturen und Prozesse, die dem menschlichen Auge verborgen bleiben; ebenso wie anderen Strahlenarten als der Neutronenstrahlung. Die Neutronenforschung an der TUM begann im Jahr 1957 mit dem Forschungsreaktor München (FRM) als erster nuklearer Anlage der Bundesrepublik Deutschland. Wegen seiner markanten Architektur, die von Professor Dr. Gerhard Weber (1909 – 1986) stammt, wird sie Atom-Ei genannt und ziert das Wappen der Stadt Garching. Unter der Leitung von Professor Heinz Maier-Leibnitz

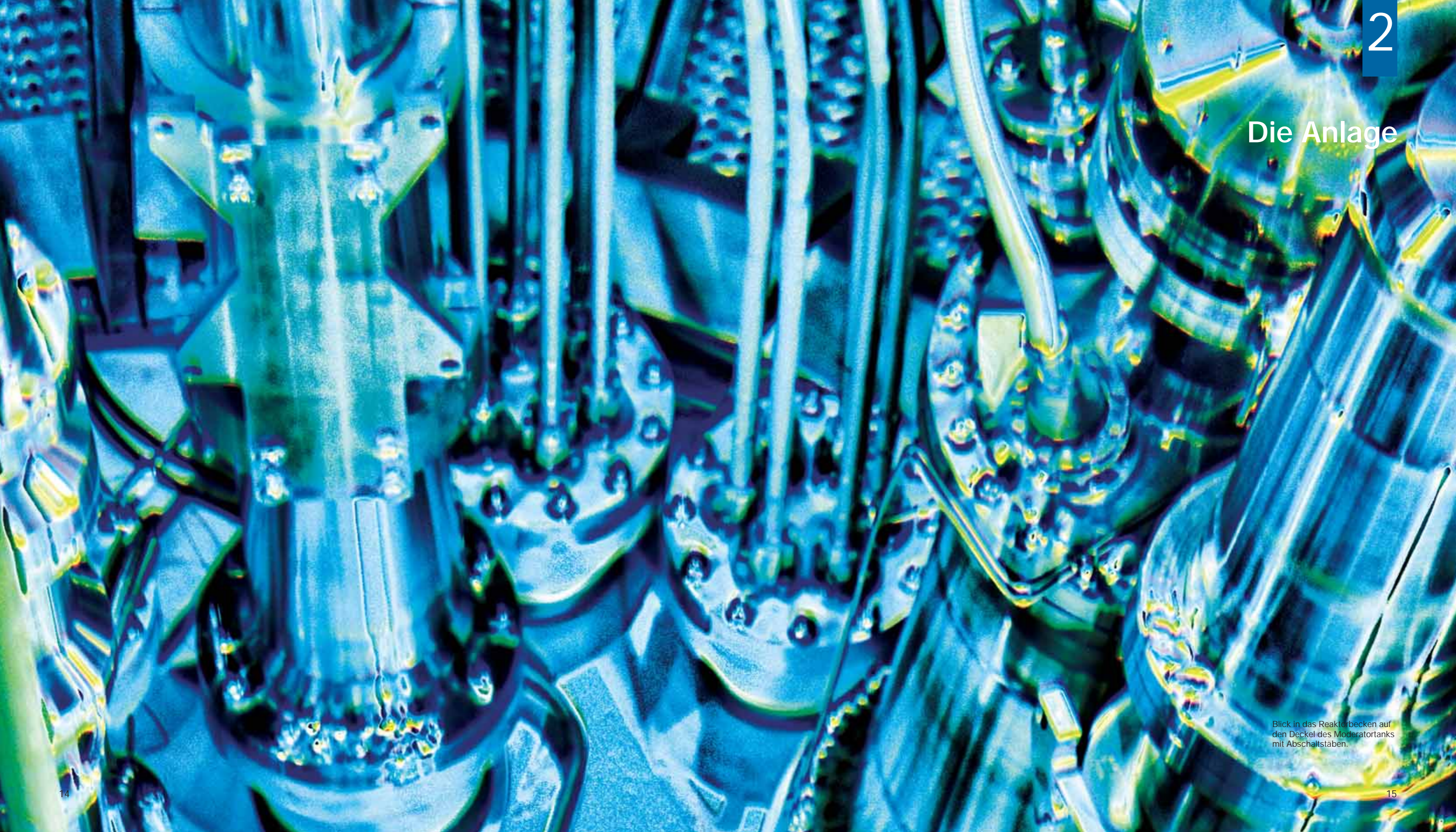
und seinen Nachfolgern lieferte das Atom-Ei 43 Jahre lang zuverlässig Neutronen. Die Wissenschaftler entwickelten in Garching grundlegende Methoden, die heute weltweit in Neutronenquellen eingesetzt werden. Im Jahr 2000 wurde der FRM außer Betrieb genommen.

Als Nachfolgerin startete im Jahr 2004 die Forschungs-Neutronenquelle Heinz Maier-Leibnitz (FRM II): Sie liefert wesentlich mehr Neutronen als das Atom-Ei, hat eine bessere Strahlqualität und neu entwickelte Instrumente. 70 Prozent der Neutronenstrahlen stehen der Grundlagenforschung zur Verfügung, die angewandte Forschung sowie Medizin und Industrie nutzen 30 Prozent.

Die Forschung mit Neutronen versucht Fragen nach Ursprung und Aufbau der Materie zu beantworten. Sie findet praktische Anwendung in der Entwicklung neuer Materialien und Verbesserung von Produkten des täglichen Lebens. Selbst die Medizin bedient sich der Wirkung von Neutronen.

Panoramaaufnahme des FRM II mit Gebäude Ost, Reaktorgebäude, Neutronenleiterhalle West und Atom-Ei (von links nach rechts).

Die Anlage



Blick in das Reaktorbecken auf den Deckel des Moderatorotanks mit Abschaltstäben.



Das Neutron

Neutronen machen die Hälfte der Masse unserer Erde aus. Sie wurden erst 1932 entdeckt, weil sie in den Atomkernen versteckt sind. Um sie als freie Teilchen beobachten und nutzen zu können, muss man sie aus den Atomkernen herausholen. Dies gelang erstmals gezielt dem Engländer James Chadwick (1891 – 1974), der dafür 1935 mit dem Nobelpreis für Physik belohnt wurde. Er entdeckte, dass die Teilchen keine elektrische Ladung besitzen und nannte sie aufgrund dieser Neutralität „Neutronen“.

Ihre Wechselwirkung mit Materie macht die Neutronen vielfältig einsetzbar in Natur- und Ingenieurwissenschaften, Medizin und Industrie. Neutronen können zerstörungsfrei Information aus dem Inneren massiver Proben liefern. Weil sie klein und neutral sind, durchdringen Neutronen feste Stoffe mühelos. Zehn Zentimeter Aluminium schwächen einen Strahl langsamer Neutronen nur um 37 Prozent ab, eine zehn Zentimeter dicke Bleiplatte sogar nur um 17 Prozent.

Einzigartige Eigenschaften

Oft klassifiziert man freie Neutronen nach ihrer Geschwindigkeit oder Energie. Um diese zu ändern, müssen die Neutronen mit Materie durch Stöße in Wechselwirkung treten, wobei sie deren Temperatur annehmen. Mithilfe der Quanten-



Interferenz von Wasserwellen.

mechanik lassen sich Neutronen auch als Welle beschreiben; sie haben also eine Wellenlänge. Je höher die Energie, desto schneller und heißer die Neutronen und umso kleiner die Wellenlänge. Je kälter ein Neutron, desto größer die Wellenlänge.

Magnetisches Moment

Obwohl elektrisch neutral, tragen Neutronen ein magnetisches Moment: Sie verhalten sich wie winzige Magnete, die in äußeren Magnetfeldern eine Kraft verspüren. Treffen die Neutronen auf Atome der zu untersuchenden Probe, ändert das magnetische

Moment der Neutronen seine Ausrichtung, sofern die streuenden Atome ebenfalls ein magnetisches Moment tragen. Diese Änderung ist dann ein Maß für die Größe und Ausrichtung des atomaren Magnetismus.

Neutronenbeugung

Die Wellenlänge thermischer Neutronen ist etwa so groß wie der Abstand zweier Atome eines festen Stoffes. Ähnlich wie Wasserwellen an einem Hindernis werden Neutronenwellen an regelmäßig angeordneten Atomen einer Probe (Kristallgitter) gebeugt. Hierbei ist der Beugungswinkel ein

	Temperatur in Kelvin (K)	Wellenlänge in Nanometer	
Ultrakalte Neutronen	<1	1.000 - 10	Der FRM II produziert Neutronen mit maßgeschneiderter Wellenlänge, optimiert für die verschiedenen Anwendungen. 0 Kelvin (K) ist der absolute Nullpunkt und entspricht -273 °Celsius. Die Wellenlängenbereiche können überlappen.
Kalte Neutronen	25	2,5 - 0,2	
Thermische Neutronen	300	0,5 - 0,07	
Heiße Neutronen	2300	0,14 - 0,028	
Schnelle Neutronen	10000000	-	



ganz empfindliches Maß für den Abstand der Atome. Ein Neutronenstreuexperiment erlaubt es uns somit die genaue Anordnung von Atomen zu bestimmen.

Geschwindigkeit der Neutronen

Außer der Richtung kann sich bei einem solchen Experiment auch die Geschwindigkeit des Neutrons ändern. Es wird von der Bewegung der Atome in der Probe beschleunigt oder abgebremst. Dadurch lässt sich die Bewegung oder Schwingung der Atome bestimmen. Die Neutronen sind für derartige Untersuchungen besonders geeignet, da ihre Temperatur nahezu der der zu untersuchenden Probe entspricht.

Neutronenleiter

Ähnlich wie Licht werden Neutronen an ebenen Oberflächen gespiegelt. Deswegen kann man sie wie Licht in Neutronenleitern leiten. Auch sie gehorchen den uns vom sichtbaren Licht bekannten Gesetzen der Optik. Weil die Wellenlänge des Neutronenlichts 5000 Mal kleiner ist als die des sichtbaren Lichts, sind die Neutronenapparaturen – einem Paradoxon der Physik folgend – um einen ähnlichen Faktor größer.

Kontrastreich

Neutronen interagieren nicht nur mit verschiedenen chemischen



Blick in den Neutronenleitertunnel: Durch die umhüllten Neutronenleiter fliegen die kalten Neutronen vom Reaktor zu den Experimentierplätzen.

Elementen unterschiedlich stark, sondern sogar mit den Isotopen desselben Elements. Dieses Verhalten macht sie für die Untersuchung von wasserstoffhaltigen Proben, wie Polymeren oder Proteinen, interessant. Ersetzt man Wasserstoff durch das chemisch gleichwertige Isotop Deuterium (schwerer Wasserstoff), ändert sich das Beugungsbild der Neutronen stark. Durch diesen Austausch können einzelne Moleküle oder Abschnitte von Molekülen markiert und so für die Neutronenstrahlen sichtbar gemacht werden.

Vielfältige Anwendungen

Neutronen werden nicht nur an den Atomkernen gestreut, sondern durchaus auch von Atomkernen absorbiert. Sie verursachen Kernreaktionen. Das Produkt kann ein neuer stabiler Kern sein, zum Beispiel bei der Umwandlung von Silizium in Phosphor zur Siliziumdotierung. Kernreaktionen können aber auch zu einem neuen instabilen und deshalb radioaktiven Kern führen, zum Beispiel für die Herstellung von Radiopharmaka.

Schnelle, ungebremste Neutronen, wie sie bei der Spaltung des Uran-Isotops frei werden, werden u.a. für die Therapie oberflächennaher Tumore eingesetzt. Die Effizienz im Abtöten der krebsartigen Zelle ist hierbei bis zu zehn Mal höher als die der herkömmlichen Röntgen- und Gamma-Strahlen. Freie Neutronen können auch selbst zum Versuchsobjekt werden. Sie zerfallen nach einer mittleren Lebensdauer von 14,8 Minuten in Proton, Elektron und Antineutrino und geben so Auskunft über die Kräfte, die das Neutron und die Kerne zusammenhalten.

Der FRM II liefert neben maßgeschneiderten Neutronen auch den weltweit intensivsten Positronenstrahl. Besonders energiereiche Gamma-Strahlung, wie sie bei der Kernreaktion von Neutronen und Cadmium sowie bei der Kernspaltung im Reaktor entsteht, wandelt sich spontan in Materie um. Hierbei wird jeweils ein Elektron (Materie) und ein Positron (Antimaterie) erzeugt. Diese Positronen werden für die Materialforschung verwendet.



Die Neutronenquelle

So wie eine Lichtquelle kontinuierlich und mit konstanter Intensität Licht erzeugt, soll die Neutronenquelle – daher der Name – für einen ununterbrochenen und gleichmäßigen Fluss von Neutronen sorgen. Ein hoher Neutronenfluss ($8 \cdot 10^{14}$ Neutronen/cm²s) bei einer vergleichsweise geringen Wärmeleistung von 20 Megawatt wird durch einen besonders kleinen Reaktorkern erreicht. Im Gegensatz dazu haben Kernkraftwerke mit einem großen Reaktorkern eine circa 200fach höhere thermische Leistung um Strom zu produzieren. Der FRM II dient ausschließlich der Produktion von Neutronenstrahlen für wissenschaftliche Experimente und industrielle Anwendungen. Er zeichnet sich durch höchste Flussdichte bei geringer Leistung,

größte Anwendungsbreite und geringe störende Untergrundstrahlung aus.

Wie Neutronen frei werden

Der Reaktorkern besteht aus einem einzigen besonders kleinvolumigen Brennelement, das durch leichtes Wasser (H₂O) gekühlt wird. Es steht im Zentrum eines mit Schwerwasser (D₂O) gefüllten Moderator tanks.

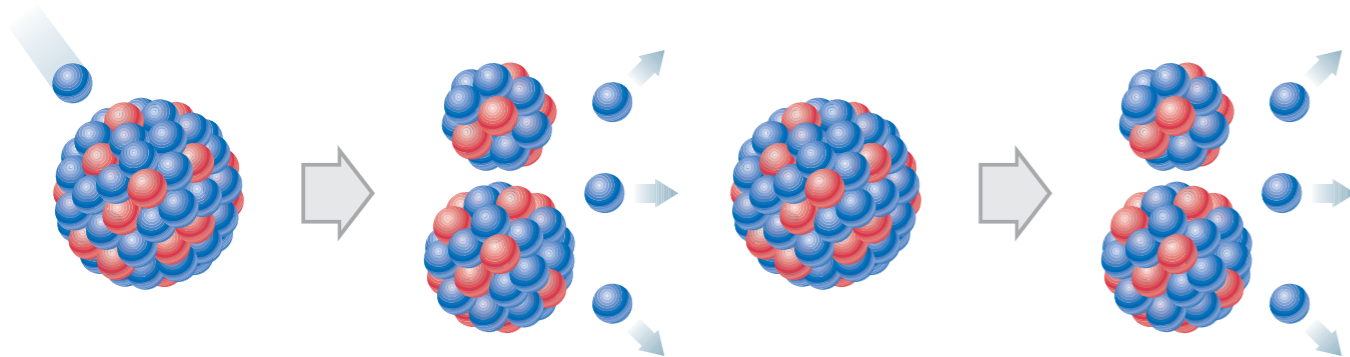
Brennelement

Das zylindrische Brennelement hat eine Höhe von 133 cm und einen Außendurchmesser von 24 cm. Im Inneren dieses Zylinders sind 113 einzelne Brennstoffplatten

zum Brennelement fest verschweißt. Innerhalb dieser Platten ist die 70 cm lange und 0,6 mm dicke Brennstoffschicht fest eingeschlossen. Sie enthält Körnchen aus Uransilizid (U₃Si₂). Die Brennstoffplatten sind evolvertenförmig



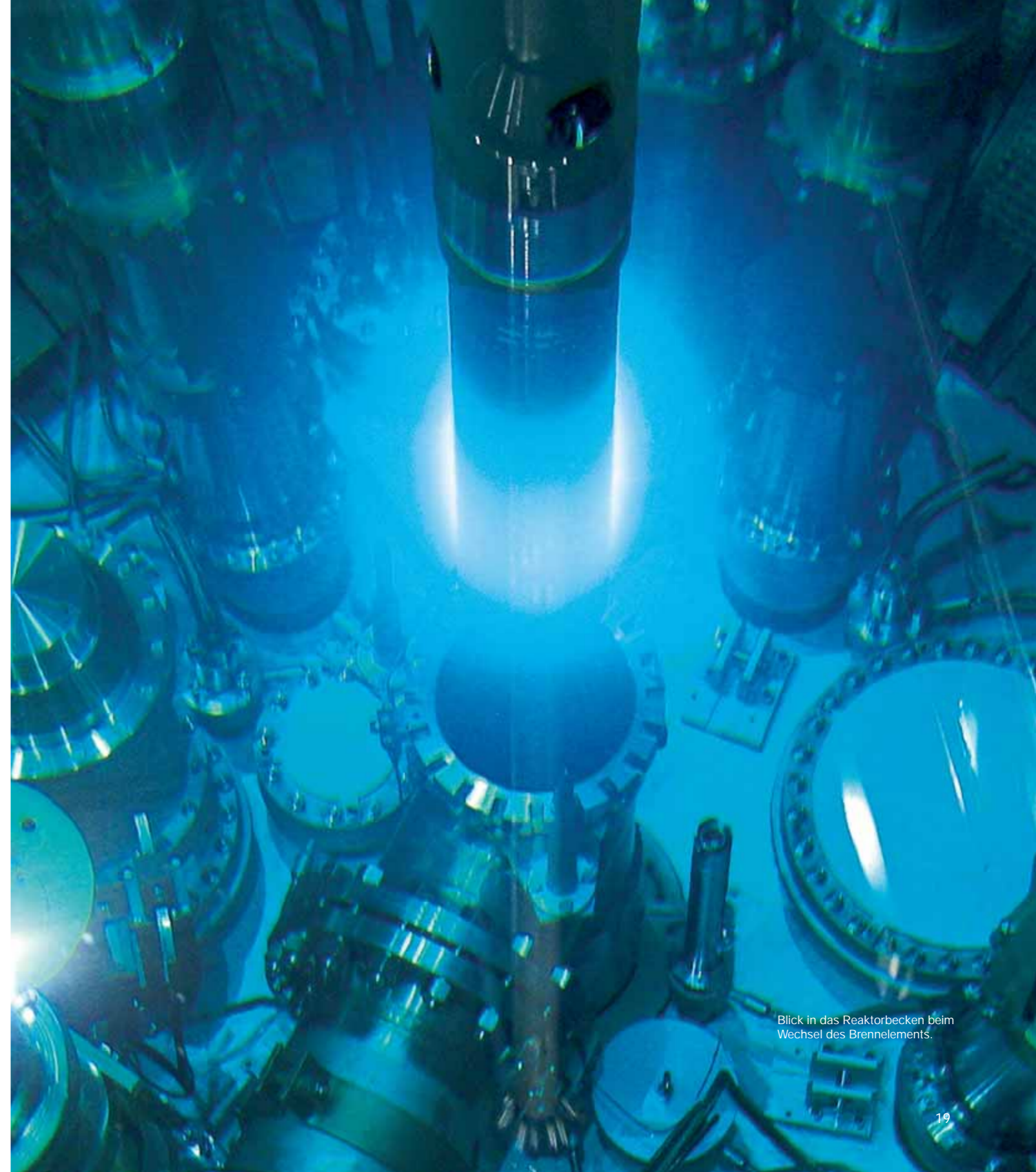
Querschnitt durch das Brennelement des FRM II.



Für die Erzeugung von Neutronenstrahlen verwendet der FRM II die Spaltung von ²³⁵Uran mit thermischen Neutronen. Bei dieser Kernre-

aktion entstehen jeweils zwei bis drei schnelle Neutronen. Diese werden sowohl im Kühlwasser als auch im schweren Wasser des Moderator-

tanks abgebremst. Die so erzeugten thermischen Neutronen spalten in einer kontrollierten Kettenreaktion weiteres Uran oder werden als Neutronen-



Blick in das Reaktorbecken beim Wechsel des Brennelements.



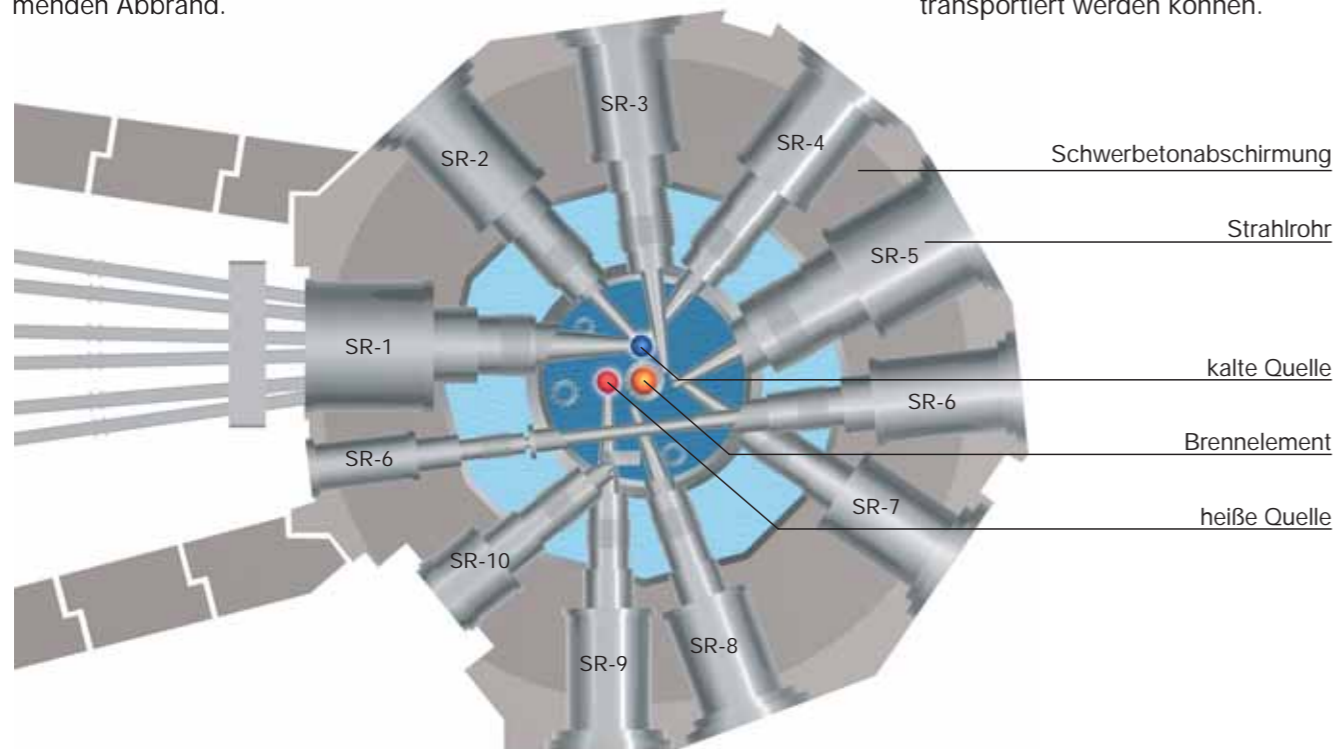
gekrümmt, sodass zwischen ihnen parallele Spalten von 2,2 mm Breite entstehen. Durch diese Spalten fließt das Kühlwasser mit einer Geschwindigkeit von 61 km/h und führt so die anfallende Wärme ab. Eine konstante Leistung von 20 Megawatt wird durch einen Regelstab gesteuert. Er besteht aus einem stark Neutronen absorbierenden Material und befindet sich im Innenkanal des Brennelements. Während des 60 Tage dauernden Zyklus wird der Regelstab langsam nach oben herausgezogen. Die so verringerte Neutronenabsorption kompensiert den zunehmenden Abbrand.

Reaktorbecken

Das Brennelement ist in einem senkrechten Zentralkanal eingebaut, der den Primärkühlkreis aus leichtem Wasser vom umgebenden Moderatortank mit schwerem Wasser trennt. Der Moderatortank mit einer Höhe und einem Durchmesser von jeweils 2,5 m befindet sich in einem mit Wasser gefüllten, 5 m weiten Reaktorbecken. Dort wird die Strahlung, die bei der Kernspaltung entsteht, nach oben durch 10 m Wasser abgeschirmt, zur Seite hin geben 1,5 m Schwerbeton zusätzliche Sicherheit.

Reaktorzyklus

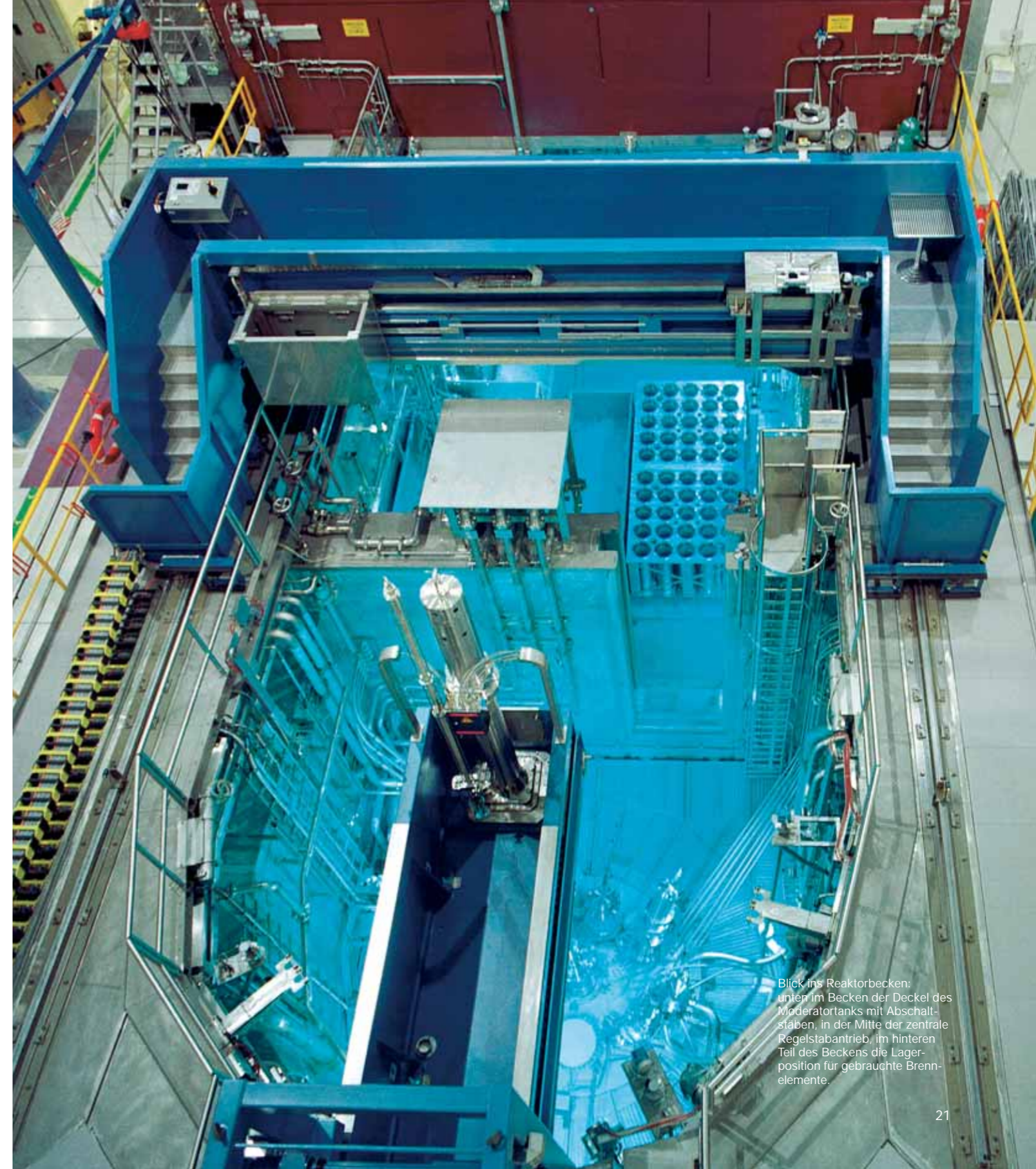
Nach einer Betriebszeit von 60 Tagen bei voller Reaktorleistung ist so viel Uran aufgebraucht, dass die Kettenreaktion nicht mehr aufrechterhalten werden kann. Das Brennelement wird dann unter Wasser aus dem Zentralkanal ausgebaut und durch ein frisches ersetzt. Zum Abklingen der Radioaktivität verbrauchter Brennelemente gibt es 50 Abklingpositionen im angrenzenden Wasserbecken. Hier stehen sie mindestens fünf Jahre, bevor sie – nach jetziger Planung – in das Zwischenlager Ahaus transportiert werden können.



Anordnung der zehn horizontalen Strahlrohre im Reaktorbecken. Strahlrohr SR-1, SR-2 und SR-4 werden von der kalten Quelle versorgt, SR-9 von der heißen Quelle. Das durchgehende SR-6 bietet

Platz für die zukünftige ultrakalte Neutronenquelle. Die Konverteranlage zur Erzeugung schneller Neutronen für die Tumorthherapie ist direkt vor SR-10 angebracht. Die übrigen Strahlrohre ragen

mit ihrer Spitze in das schwere Wasser und leiten so einen hohen Fluss thermischer Neutronen an die Instrumente.



Blick ins Reaktorbecken: unten im Becken der Deckel des Moderatortanks mit Abschaltstäben, in der Mitte der zentrale Regelstabantrieb, im hinteren Teil des Beckens die Lagerposition für gebrauchte Brennelemente.



Sekundäre Quellen

Die bei der Kernspaltung frei werdenden schnellen Neutronen werden im Kühlwasser und im schweren Wasser moderiert, d.h. abgebremst. Die mittlere Temperatur des Wassers von 309 K bestimmt dabei ihre Energie oder Geschwindigkeit von etwa 2200 m/s. Um für bestimmte Anwendungen die Energie der Neutronen zu ändern, wird ein Moderator mit einer entsprechenden Temperatur verwendet. In der kalten Quelle ist dies flüssiger schwerer Wasserstoff bei 25 K, in der heißen Quelle Graphit bei 2273 K. Beide befinden sich in nur acht Zentimeter Abstand vom Brennelement, um einen möglichst hohen Neutronenfluss zu nutzen. Am äußeren Rand des Moderator-tanks werden in der Konverteranlage durch eine weitere Kernspaltung schnelle Neutronen erzeugt, wie sie in der Tumorthherapie benötigt werden.

Darüber hinaus stellt der FRM II heute den weltweit intensivsten Strahl thermischer Positronen für die Materialforschung zur Verfügung. Dieser entsteht in einem der schrägen Strahlrohre aus hochenergetischer Gamma-Strahlung. In naher Zukunft sollen auch ultrakalte Neutronen erzeugt werden. Im durchgehenden Strahlrohr SR-6 wird dafür zurzeit eine entsprechende Quelle aufgebaut.

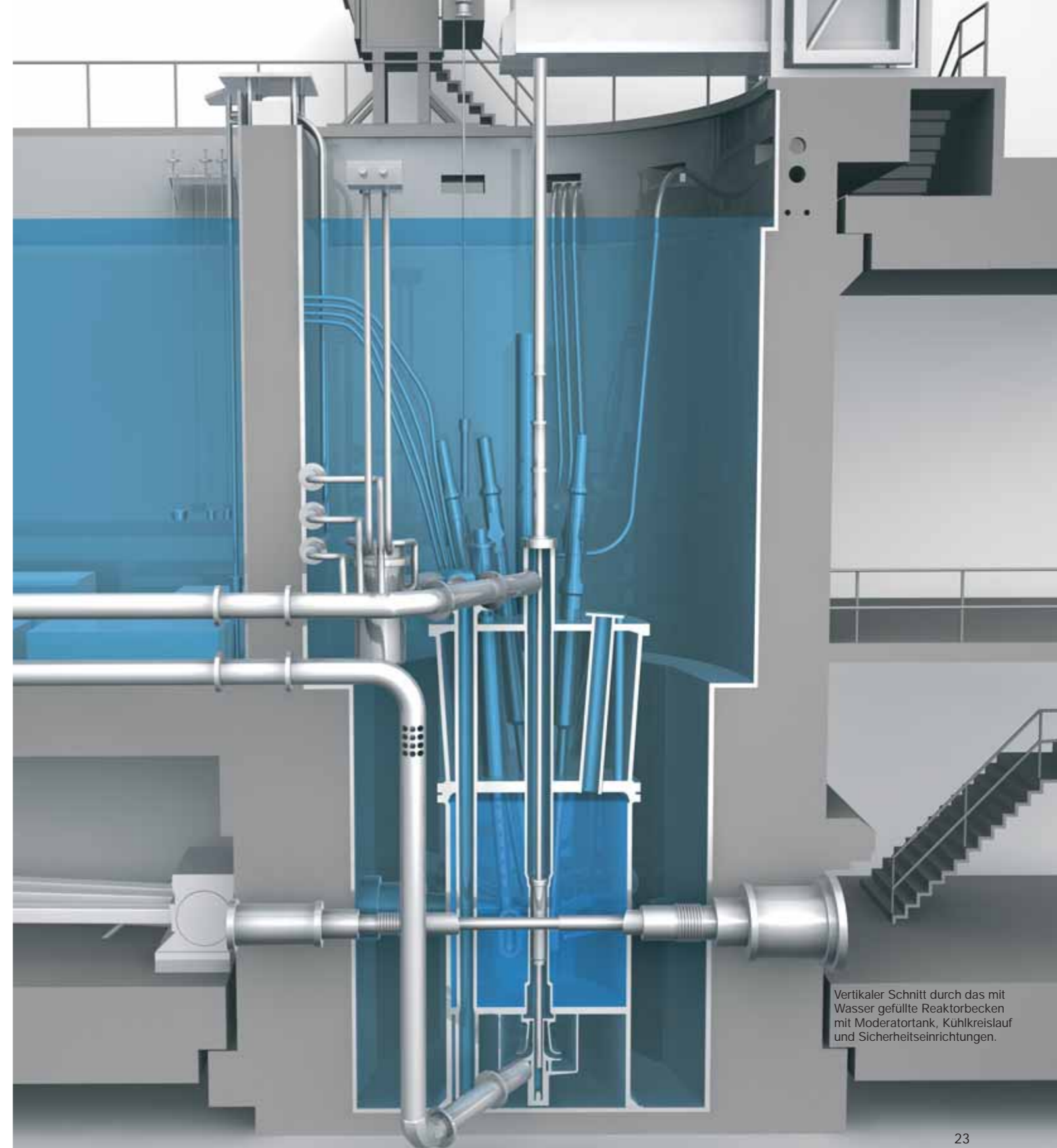
Mehrere Bestrahlungseinrichtungen ragen von oben in den großvolumigen Schwerwasser-moderatortank hinein. Zum einen werden hier mittels Rohrpostanlagen kleine Proben in 10 cm langen Kapseln in einen hohen Neutronenfluss befördert. Zum anderen werden große Siliziumblöcke in einer speziellen Dotierungsanlage bestrahlt.



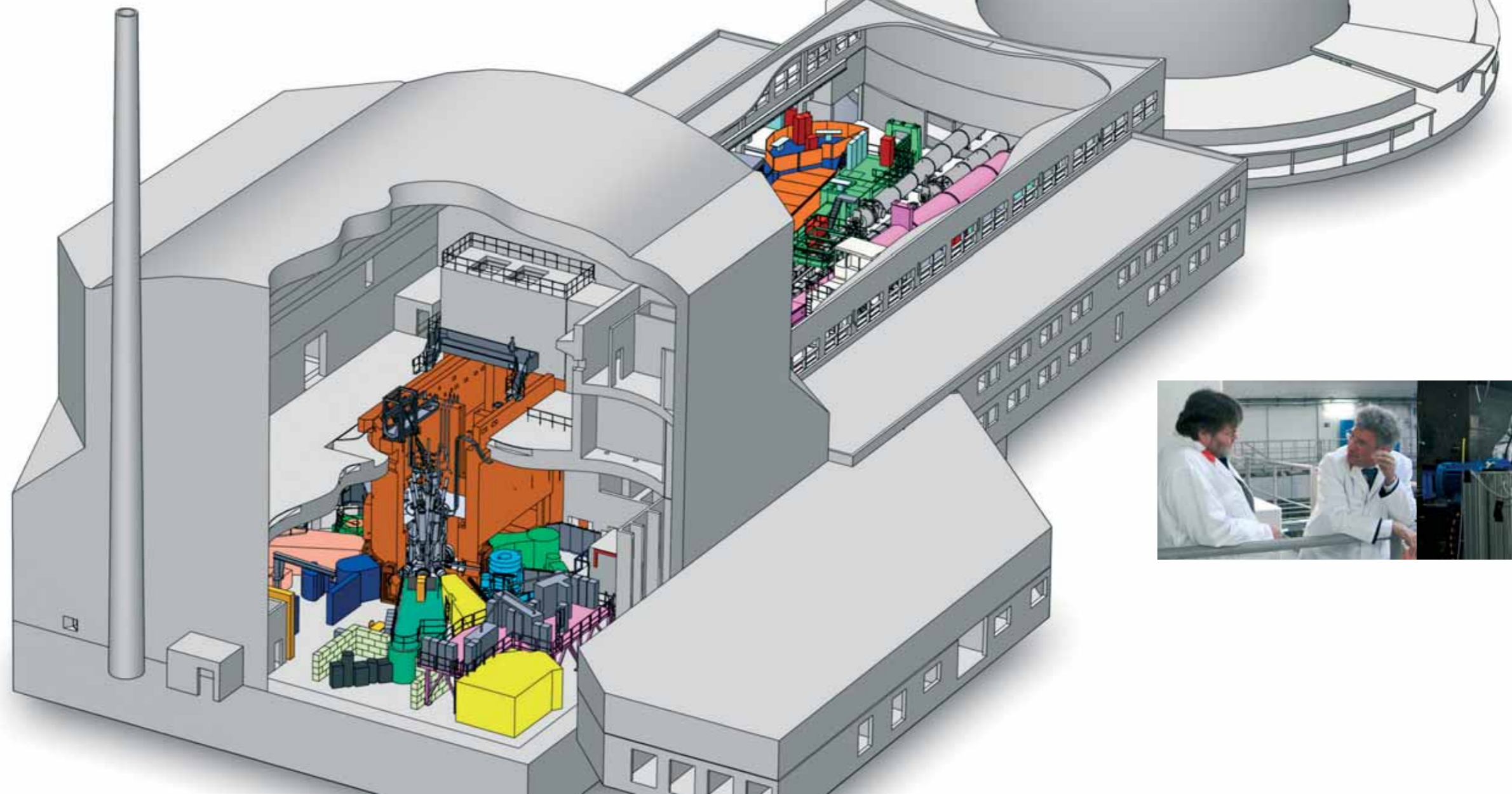
Moderator der heißen Quelle.



Inspektion der kalten Quelle vor ihrem Einbau.



Vertikaler Schnitt durch das mit Wasser gefüllte Reaktorbecken mit Moderator-tank, Kühlkreislauf und Sicherheitseinrichtungen.



Blick in das Innere von Reaktorgebäude, Neutronenleiterhalle West und Atom-Ei (von links). Wissenschaftler an den Instrumenten.



Auf dem Weg zu den Experimentierplätzen

Nur in geringem Maße werden die Neutronen direkt im Moderatortank verwendet, wie dies beispielsweise bei der Isotopenproduktion und Siliziumdotierung der Fall ist. Deshalb gelangen die Neutronenstrahlen über insgesamt zehn horizontale Strahlrohre in die Experimentier- und die Neutronenleiterhalle. Bei einem Strahlquerschnitt von typischerweise $8 \times 12 \text{ cm}^2$ können über ein Strahlrohr zwei Instrumente versorgt werden. Eine Ausnahme macht hier das Strahlrohr SR-1, das über sechs abzweigende Neutronenleiter die gesamte Neutronenleiterhalle versorgt.

Neutronen werden an glatten Oberflächen reflektiert. Diese Spiegelung wird in den Neutronenleitern angewandt. Sie bestehen aus aneinander gereihten, innen verspiegelten und bis zu 2 m langen Glaskästen, in deren Inneren Vakuum herrscht. Sie leiten Neutronen über Distanzen von bis zu 60 m hin zu den einzelnen Experimentierplätzen. Dabei kann auch ein Neutronenleiter gleichzeitig mehrere Instrumente mit Neutronen versorgen. Durch die

Reflektion an den verspiegelten Oberflächen werden die Neutronenstrahlen nach ihrer Wellenlänge gefiltert. Trifft das Neutron in einem bestimmten Winkel auf die Oberfläche, so werden nur Neutronen ab einer minimalen Wellenlänge reflektiert, die anderen durchdringen den Spiegel. Diesen Effekt kann man durch Krümmung des Leiters für das jeweilige Instrument optimieren.

Die Experimentierplätze des FRM II befinden sich zurzeit in zwei Gebäuden. In der Experimentierhalle im Erdgeschoss des Reaktorgebäudes stehen die Instrumente, die durch die Nähe zur Quelle von einem sehr hohen Neutronenfluss profitieren. Sehr große Instrumente, wie die Kleinwinkelstreuapparaturen mit Längen von 40 m, sind in der Neutronenleiterhalle West untergebracht, die an das Reaktorgebäude angrenzt. Die 2006 errichtete Neutronenleiterhalle Ost wird in naher Zukunft über vier Neutronenleiter und einen Positronenstrahl versorgt. Zum Teil kann dort dann bereits vorhandenen Instrumenten mehr Platz eingeräumt werden, darüber hinaus werden auch ganz neue Experimentierplätze eingerichtet.



Studenten bei der Experimentvorbereitung am Instrument HEiDi.



Brennstoff im Griff

Primäres Sicherheitsziel ist es, dass die radioaktiven Spaltprodukte des Brennelements in seiner Struktur eingeschlossen bleiben. Dies ist beim FRM II durch die Wahl eines speziellen Brennstoffes gewährleistet. Das thermisch äußerst stabile Uransilizid (U_3Si_2) hält die entstehenden Spaltprodukte schon in seiner mikroskopischen Struktur zurück. Die Uransilizid-Körner sind zur besseren Wärmeabfuhr in Aluminiumpulver vermischt. Das Uran-Aluminium-Gemisch ist zudem in einer dichten Aluminium-Verpackung eingebettet, die als zusätzliche Barriere gegen den Austritt von Spaltprodukten dient. Diese Bauart hat sich seit Jahrzehnten als wirksamster Schutz gegen die Freisetzung von radioaktiven Stoffen bewährt. Als redundante weitere Barrieren zur Rückhaltung von Radioaktivität dienen das Reaktorbecken und die 1,80 Meter starke Reaktorhülle.

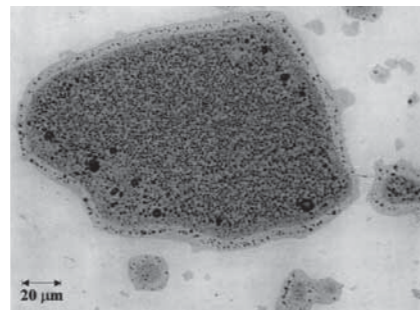
Sicherheit bis ins Detail

Der Betrieb einer nuklearen Anlage erfordert besonderes Verantwortungsbewusstsein des Betreibers. Am FRM II sind deshalb höchste Sicherheitsmaßnahmen realisiert, die sich sowohl auf den Reaktor an sich, als auch auf Einwirkungen von außen beziehen. Dies hat zu einem ausgeklügelten, mehrstufigen Sicherheitskonzept geführt,

das in seinen wesentlichen Elementen redundant ist und alle denkbaren Szenarien berücksichtigt. Ziel dieser Maßnahmen ist es, keine erhöhte Radioaktivität aus dem FRM II freizusetzen.

Sicherheit durch Naturgesetze

Die nukleare Sicherheit des FRM II wird durch physikalische Gesetzmäßigkeiten unterstützt. Ein Aspekt dieser inhärenten, passiven Sicherheit ist die im Verhältnis zum kleinen Brennelement große Wassermenge von 700 m^3 . Sie kann die Restwärme bei einem angenommenen Ausfall der Kühlwasserpumpen vollständig aufnehmen. Ein weiterer Aspekt: Die Kettenreaktion im FRM II findet nur dann statt, wenn sich im Inneren des Brennelements leichtes Wasser und außen im Moderator-tank schweres Wasser befindet. Fehlt eine der beiden Komponenten oder mischt sich leichtes mit schwerem Wasser, so endet die Kettenreaktion.



Mikroskopische Aufnahme eines Uransilizid-Korns.



Intensives Forschen für einen neuen hochdichten Brennstoff.

Exkurs: Hoch angereichertes Uran (HEU) als Brennstoff

Natururan besteht zu 99,3 Prozent aus dem Isotop $^{238}\text{Uran}$. Nur 0,7 Prozent sind spaltbares $^{235}\text{Uran}$. Für die Nutzung in einem Reaktor ist eine Anreicherung des spaltbaren Urans notwendig. Die Verwendung von Uran hoher Anreicherung (Highly Enriched Uranium, HEU) mit 93 Prozent des spaltbaren Isotops $^{235}\text{Uran}$ ist für den FRM II vorteilhaft, weil das Kernvolumen und damit die Reaktorleistung besonders klein sind und die Neutronenverluste durch Absorption im $^{238}\text{Uran}$ gering gehalten werden können. Dazu trägt auch die hohe Dichte des

Brennstoffs Uransilizid von bis zu 3 g/cm^3 bei. Die Verwendung von HEU reduziert zudem die radioaktive Strahlung des verbrauchten Brennelements drastisch. Aus diesen Gründen werden zurzeit alle international relevanten Hochflussquellen mit HEU betrieben. Die TUM unterstützt die weltweiten Anstrengungen, die Verwendung von hoch angereichertem Uran zu minimieren. Deshalb arbeitet der FRM II im internationalen Verbund seit dem Jahr 2003 an der Entwicklung neuartiger Brennstoffe mit einer Dichte von bis zu 15 g/cm^3 . Diese sollen eine geringere Anreicherung von unter 50 Prozent (Medium Enriched Uranium, MEU) ermöglichen.



Die Experimentierhalle mit zahlreichen Instrumenten, die um das Reaktorbecken herum angeordnet sind.



Aktive Sicherheit

Neben der passiven Sicherheit durch physikalische Gesetzmäßigkeiten besitzt der FRM II ein aktives Sicherheitssystem, das die Kettenreaktion jederzeit zuverlässig stoppen kann. Es überwacht eine Vielzahl von Messwerten, wie beispielsweise Temperatur oder Durchfluss des Kühlwassers, für den sicheren Betrieb der Anlage. Sollten nennenswerte Abweichungen von einem vorgegebenen Sollwert auftreten, so greift dieses Reaktorschutzsystem und es kommt zu einer Schnellabschaltung. Hierbei fällt der Regelstab in seine Ausgangsposition und unterbricht die Kettenreaktion. Als weiteres, redundantes Sicherheits-

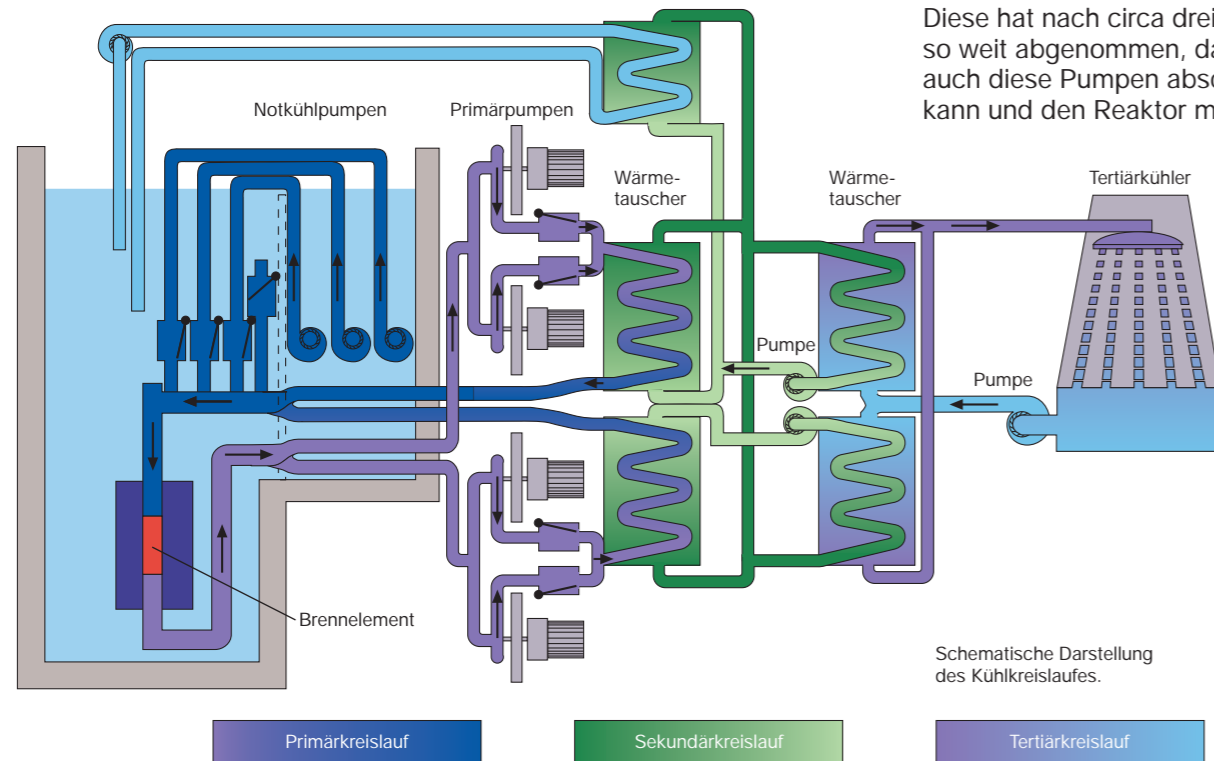
system gibt es fünf Abschaltstäbe, die außerhalb des Brennelementes in gleicher Weise den Reaktor abschalten, wozu vier der fünf Abschaltstäbe ausreichen. Sollte etwa der Strom ausfallen, fallen Regelstab und Abschaltstäbe von selbst nach unten: Die Kettenreaktion ist gestoppt.

Kühlkreislauf

Auch das Kühlsystem ist Teil der aktiven Sicherheitseinrichtung am FRM II. Es besteht aus einem primären, einem sekundären und einem tertiären Wasserkreislauf. Der Primärkreislauf des Reaktors besitzt vier Pumpen, die Wasser direkt durch das Brennelement

strömen lassen. Die Wassertemperatur erhöht sich dabei ungefähr von 36 °C auf 51 °C. Je zwei Pumpen sind zu einem Strang zusammengefasst, wobei jeder der beiden Stränge ausreicht, um die Restwärme abzuführen. Die Abwärme des Reaktors wird über Wärmetauscher vom Primär- in den Sekundär- und von dort in den Tertiärkreislauf übergeführt. Aus dem Tertiärkreislauf wird die Wärme über vier kleine Kühltürme an die Luft abgegeben.

Bei einer Schnellabschaltung des Reaktors laufen unverzüglich drei zusätzliche Notkühlpumpen an, die Beckenwasser durch den Kern fördern. Eine einzige würde bereits ausreichen, um die Nachwärme des Reaktors abzuführen. Diese hat nach circa drei Stunden so weit abgenommen, dass man auch diese Pumpen abschalten kann und den Reaktor mit dem



vorhandenen Beckenwasser durch Konvektion kühlt: Warmes Wasser steigt nach oben.

Schutz vor Einflüssen von außen

Verantwortlich handeln heißt, unwahrscheinliche Ereignisse ebenfalls in Betracht zu ziehen, um Risiken auszuschließen. Deshalb ist der FRM II auch gegen massive Einflüsse von außen geschützt, wie Flugzeugabsturz, Erdbeben oder Hochwasser. Dies wurde von unabhängigen Gutachtern bestätigt. Einem Erdbeben der Stärke 5,8 auf der Richterskala, wie es maximal im Raum München unterstellt wird, hält die 1,80 m dicke, stark mit Eisen armierte Betonhülle des Reaktorgebäudes stand. Sie schützt auch vor einem eventuellen Flugzeugabsturz, selbst wenn es sich bei der abstürzenden



Die Außenwand des Reaktorgebäudes (hier die Außenwand an der Lkw-Schleuse) misst 1,80 Meter.

Maschine um ein Großraum-Passagierflugzeug oder einen Militärjet handelt. Eine dabei entstehende Schockwelle hätte zudem keinen Einfluss auf das Reaktorbecken, da es durch eine circa 15 cm dicke Ausgleichsfuge vom Gebäude entkoppelt ist. In Betracht gezogen wurde auch, dass die Isar über ihre Ufer treten könnte. Ein Barriersystem hält einen Wasserstand zurück, der nach Berechnungen nur einmal in 10.000 Jahren auftritt.

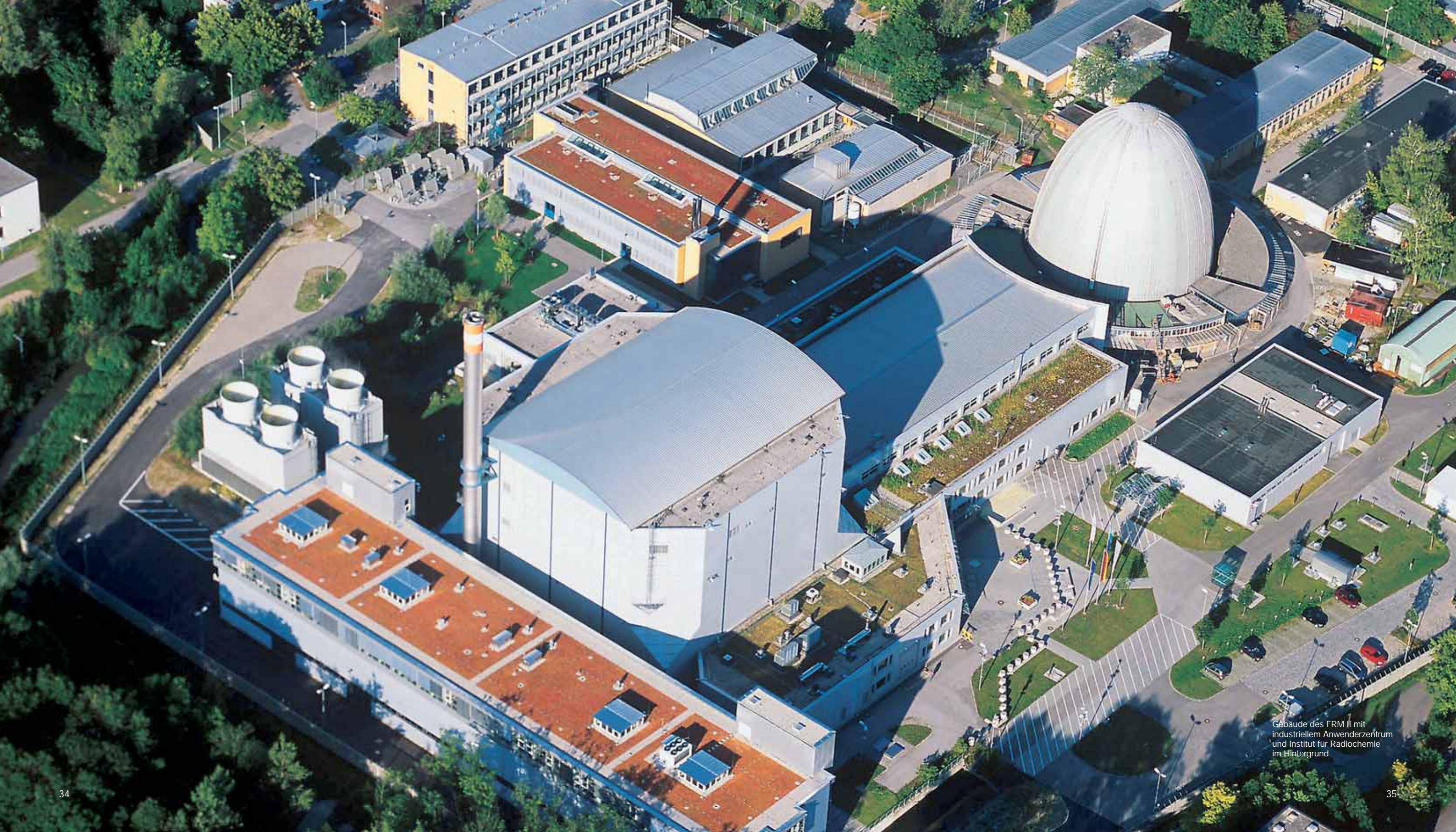


Anordnung der Abschaltstäbe im Moderatortank. In der Mitte der Zentralkanal mit dem Brennelement, darum herum schräg die Abschaltstäbe (hier drei zu sehen). Mehrere Strahlrohrnasen ragen in den hohen Neutronenfluss. Aufnahme aus der Bauphase.

Das Sicherheitskonzept des FRM II funktioniert auch bei einem totalen Stromausfall, verursacht beispielsweise durch Blitzschlag oder Sturm. In einem solchen Fall wird eine Schnellabschaltung des Reaktors ausgelöst. Notstromgeneratoren und zusätzliche Batterien garantieren währenddessen eine ununterbrochene Stromversorgung für die Sicherheitseinrichtungen einschließlich der Notkühlpumpen.

Exkurs: Kategorien von Störfällen

Jedes Ereignis, das vom Normalbetrieb abweicht, muss in einer kerntechnischen Anlage wie dem FRM II genau dokumentiert und gegebenenfalls gemeldet werden. Dabei sind nicht sicherheitstechnisch relevante betriebliche Störungen (z.B. Ausfall von Geräten oder Messanlagen) von Ereignissen zu unterscheiden, die die Reaktoranlage betreffen. Das internationale System für die Bewertung von nuklearen Störungen und Unfällen (INES) umfasst sieben Stufen. Betriebsstörungen fallen in die Stufen 0 und 1, Störfälle in die Stufen 2 bis 3 und Unfälle in die Stufen 4 bis 7. Die Havarie des Kernkraftwerkes Tschernobyl 1986 entsprach der Stufe 7. Seit Inbetriebnahme des FRM II gab es keine Vorkommnisse, die nach INES 1 oder höher eingestuft wurden.



Gebäude des FRM II mit
industriellem Anwenderzentrum
und Institut für Radiochemie
im Hintergrund.



Der Strahlenschutz

Besonderes Augenmerk legt der FRM II auf den Schutz von Personen und der Umwelt vor zusätzlicher Strahlenbelastung. Ziel ist es, sowohl die Strahlenbelastung der Anwohner durch die Emissionen der Neutronenquelle praktisch auszuschließen, als auch die der Beschäftigten am FRM II bei ihrer Arbeit äußerst gering zu halten.

Überwachung der Emissionen

Zur Überwachung der Strahlenbelastung werden sämtliche Stoffe, die den Kontrollbereich des FRM II verlassen, von der Strahlenschutzabteilung genauestens überprüft. Mithilfe modernster Messmethoden wird die Abgabe radioaktiver Stoffe bilanziert, bewertet und das Ergebnis der Aufsichtsbehörde vorgelegt. Zudem sind am FRM II betriebene Messgeräte an das Kernreaktor-Fernüberwachungssystem der atomrechtlichen Aufsichtsbehörde und des Landesamts für Umwelt angeschlossen. Somit überprüfen die Behörden jederzeit den aktuellen Zustand der Neutronenquelle und die radioaktiven Abgaben an die Umgebung (Internet: http://inters.bayern.de/kfue/station_kfue.htm). Neben der Überwachung der radioaktiven Emissionen wird auch die Umgebung der Neutronen-

nenquelle umfangreich auf radioaktive Stoffe untersucht. Kontrolliert werden Luft, Niederschlag, Boden und Bewuchs, Nahrungs- und Futtermittel, Oberflächenwasser, Grundwasser, Sedimente in Gewässern sowie Klärschlamm und Abwasser in Kläranlagen.

Höchste Sicherheit für Personen

Aus den radioaktiven Emissionen wird jedes Jahr für eine hypothetische Referenzperson die Dosisbelastung errechnet. Es wird angenommen, dass sich diese Person dauerhaft in unmittelbarer Umgebung um das Reaktorgebäude aufhält und sich von dort wachsenden Pflanzen ernährt. Der ermittelte Dosiswert darf dabei den gesetzlich vorgegebenen Dosisgrenzwert von 0,3 Millisievert (mSv) pro Jahr nicht übersteigen. Im Jahre 2006 war die Neutronenquelle an 260 Tagen in Betrieb. In diesem Jahr betrug die errechnete Dosis dieser fiktiven Person nur 0,003 mSv.

Im Mittel erhält ein Mensch durch natürliche radioaktive Stoffe und Strahlung 2 bis 3 mSv pro Jahr. Bei einem Flug etwa nach Gran Canaria setzt man sich wegen der Höhenstrahlung sogar einer bis zu sechsfach höheren Dosis aus, als wenn man sich ein Jahr lang



Im Ganzkörpermonitor werden beim Verlassen der Kontrollbereiche alle Personen überprüft.

in der unmittelbaren Umgebung des FRM II aufhalten und ernähren würde.

Bei Mitarbeitern des FRM II wird die Strahlendosis genau erfasst. Jede Person, die im Strahlenschutzbereich tätig wird, erhält hierzu ein monatlich auszuwertendes amtliches Dosimeter. Es ist sowohl gegenüber der Neutronen-, wie auch der Gamma-Strahlung empfindlich und summiert die Strahlenbelastung auf. Da dieses amtliche Dosimeter aber für den Benutzer nicht unmittelbar ablesbar ist, erhält jede Person zusätzlich ein elektronisches Dosimeter, bei dem die Dosis auf einem Display ablesbar ist. Die Dosiswerte dieser elektronischen Dosimeter werden arbeitstäglich vom Strahlenschutz erfasst und protokolliert. Das elektronische Dosimeter zeigt das Erreichen von intern vorgegebenen Grenzwerten sofort an.

Beim Verlassen der Strahlenschutzbereiche werden ausnahmslos alle Personen auf mögliche Kontaminationen überprüft. Dies geschieht mit Personen-Kontaminationsmonitoren, die an den jeweiligen Ausgängen stehen.

Exkurs: Der Wetterbeobachtungsmast

Bereits für das Atom-Ei wurde ein Wetterbeobachtungsmast (Meteomast) errichtet. Er registriert auch für den FRM II jede Minute wichtige Parameter, wie Temperatur, Luftfeuchtigkeit und Windgeschwindigkeit, um die Verteilung eventueller radioaktiver Emissionen über die Luft nachverfolgen zu können. Die Messergebnisse wertet das Meteorologische Institut der Ludwig-Maximilians-Universität München aus. Sie sind im Internet unter <http://www.meteo.physik.uni-muenchen.de/> über die Links „Wetter“, „Garching“ bzw. „Garching neuer Turm“ aktuell einsehbar.

In Zukunft misst der neue Meteomast auf einer Grünfläche südlich der Ludwig-Prandtl-Straße alle wichtigen Werte. Die Architektur des Neubaus, den die TUM-Professorin Hannelore Deubzer vom Lehrstuhl für Raumkunst und Gestaltung entwarf, hat einen das Gesamtgelände prägenden Charakter.

Die Nutzung der Neutronen

Kristall vor dem Diffraktometer POLI-HEIDI zur Untersuchung mit polarisierten, heißen Neutronen.



Grundlagenforschung mit Neutronen

Neugier ist die treibende Kraft der Grundlagenforschung. Sie sucht Antworten auf Fragen nach allgemeinen Naturgesetzen und reicht von der Untersuchung des Ursprungs des Universums bis hin zu alltäglichen Phänomenen, wie dem der Schwerkraft, bei der noch viele Fragen offen sind. Interessiert man sich für die Bausteine der Materie und die Kräfte oder Wechselwirkungen, die diese zusammenhalten, so kann man entweder kleinste Teilchen in einem großen Beschleuniger aufeinanderprallen lassen – wie bei den Experimenten am CERN – oder man untersucht einen natürlichen Zerfall der Elementarteilchen, wie zum Beispiel den des Neutrons in Proton, Elektron und Antineutrino. Hierfür eignen sich besonders Neutronen mit geringer Geschwindigkeit, die in hinreichender Anzahl beim Durchqueren einer Messapparatur zerfallen. Einen weiteren Einblick in die fundamentalen Wechselwirkungen der Materie liefert die Messung der Lebensdauer und des elektrischen Dipolmoments des Neutrons.

Das Neutron als Forschungsobjekt

Um die Lebensdauer des Neutrons zu messen, zählt man in regelmäßigen Abständen die Neutronen, die in einem Volumen eingeschlossen sind. Von Zeit zu Zeit öffnet man das Gefäß und bestimmt die Anzahl der ausströmenden Neutronen. Durch den natürlichen Zerfall der Neutronen mit einer Halbwertszeit von 14,8 Minuten nimmt diese Anzahl kontinuierlich ab. Die Kunst hierbei besteht darin, die Neutronen in einem Gefäß einzuschließen, ohne dass sie durch Wechselwirkung mit der Wand absorbiert werden. Ultrakalte Neutronen mit einer Geschwindigkeit von nur 5 m/s werden von der Innenseite des Gefäßes unter jedem Winkel reflektiert, ähnlich der Reflektion in einem Neutronenleiter. Diese geringe Wechselwirkung mit der Wand soll am FRM II ausgeschaltet werden, indem man die Neutronen in einem magnetischen Käfig wandfrei einzuschließen versucht. Aus der Lebensdauer des Neutrons ergeben sich Naturkonstanten, die wichtig für Berechnungen zur Entstehung des Universums sind. Die erhöhte Genauigkeit, mit der die Lebensdauer gemessen wird, trägt dann zur Überprüfung von Theorien zum Urknall bei.



Ein Blick in die Neutronenleiterhalle West.



Materialeigenschaften verstehen

Zu den spannendsten und zugleich wichtigsten Aufgaben der Naturwissenschaften gehört es, aus den Erkenntnissen über die mikroskopische Struktur auf die makroskopischen Eigenschaften von Stoffen zu schließen. Die Neutronen teilen uns mit, wo sich die Atome befinden, wie sie sich bewegen und was den Magnetismus ausmacht. Hierzu eignen sie sich besonders, weil sie mühelos auch größere Objekte durchdringen und die verschiedenen Isotope kontrastreich darstellen.

Wenn besser verstanden wird, warum Stoffe gewisse Eigenschaften haben, wie zum Beispiel hart oder weich, kann es gelingen, neue Werkstoffe zu entwickeln, die hohen spezifischen Belastungen standhalten, aber viel leichter sind als bisher verwendete Materialien. Solche Werkstoffe können zum Beispiel im Flugzeug- oder Automobilbau helfen, durch Gewichtsersparnis weniger Treibstoff zu verbrauchen.

Wasserstoff speichern

Gewichtsprobleme haben auch Wasserstoffspeicher bei der Verwendung in Fahrzeugen. Eine Lösung des Problems könnten komplexe Hydride (z.B. NaAlH_4 , $\text{Li}_4\text{BN}_3\text{H}_{10}$, Li_3AlH_6) bieten, die bei geringem Eigengewicht große Mengen von Wasserstoff auf kleinstem Raum binden. Für die

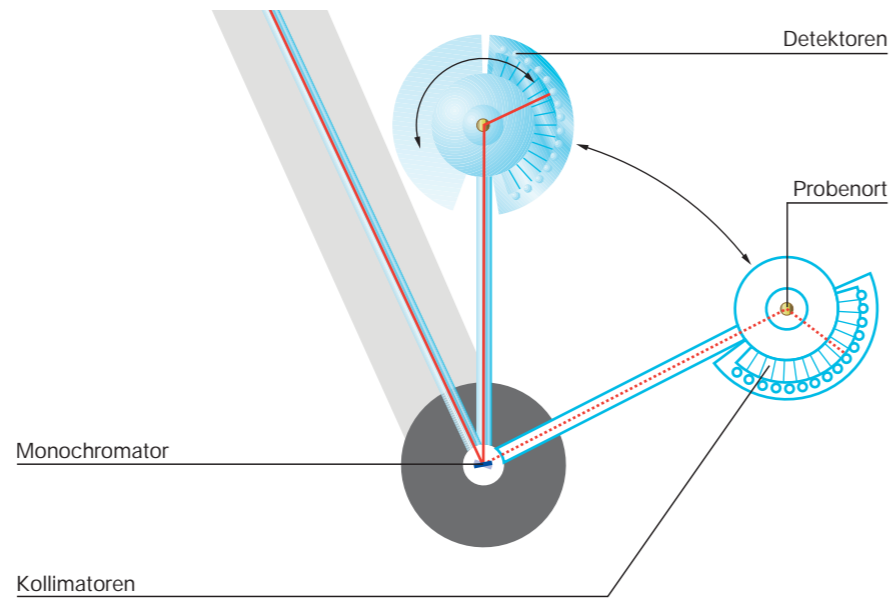
Anwendung ist es erforderlich, den gebundenen Wasserstoff durch eine reversible chemische Reaktion wieder herauszulösen. Mithilfe geringer Mengen eines Katalysators wird in der Tat der größte Teil des Wasserstoffs bei moderaten Temperaturen von 100 – 150 °C freigesetzt.

Forscher der TU Darmstadt und des Forschungszentrums Karlsruhe untersuchen die Strukturänderungen von Hydriden mit unterschiedlicher Wasserstoffbelastung. Diese Arbeiten wurden unter anderem am hochauflösenden Pulverdiffraktometer SPODI (Structure POWder DIFfractometer) am FRM II durchgeführt. Die dabei gewonnene Kenntnis der jeweiligen Atomanordnung soll eine optimale Be- und Entladung

des Wasserstoffspeichers ermöglichen. Am FRM II versucht man darüber hinaus durch die Neutronenmessungen die Katalyse besser zu verstehen, um sie weiter optimieren zu können.

Exkurs: Wo welches Atom sitzt

Selbst Neutronen können kein direktes Abbild der Atompositionen liefern. Man bedient sich stattdessen einer indirekten Methode, der Beugung. Ein wohl präparierter Neutronenstrahl trifft hierbei auf die zu untersuchende Probe und wird von den Atomkernen abgelenkt. Die Intensität unter einem bestimmten Ablenkwinkel hängt sowohl von der Atomsorte als auch vom Abstand zwischen den Atomen ab. Am Instrument



Schematischer Aufbau eines Diffraktometers.

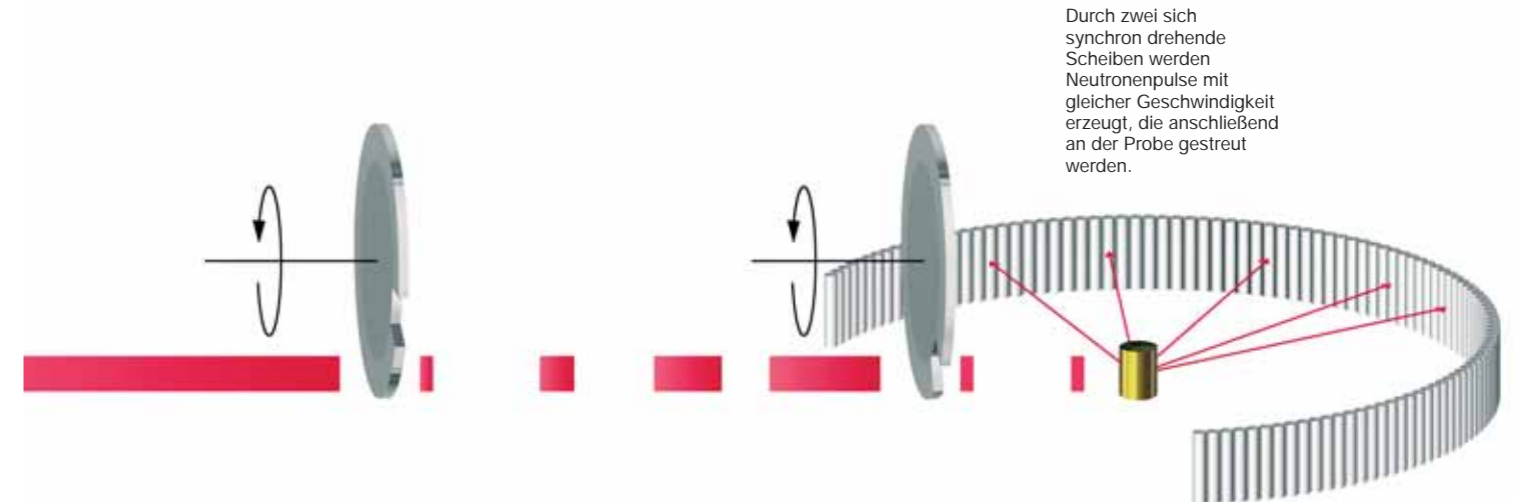


SPODI wird aus dem weißen Spektrum eines thermischen Neutronenstrahls eine Wellenlänge ausgewählt, die in etwa den Atomabständen entspricht. Ein spezieller Detektor bestimmt in Abhängigkeit vom Ablenkungs- bzw. Streuwinkel die Neutronenintensität, die anschließend in einem Diagramm aufgezeichnet wird. Hierbei ergeben sich Maxima für jeweils einen Atomabstand. Aus der Vielzahl der Maxima lässt sich dann mithilfe von komplexen Rechenprogrammen die dreidimensionale Anordnung der Atome bestimmen. Die Winkel, unter denen die Neutronen abgelenkt werden, liegen aufgrund der Atomabstände von circa 0,3 Nanometern im Bereich von 20 – 160 Grad. Deshalb wird diese Methode als Weitwinkelstreuung bezeichnet.

Exkurs: Wie sich Atome bewegen

Atome bewegen sich in vielfältiger Weise. Auf geordneten Gitterplätzen schwingen sie und hüpfen von einem Platz zum anderen. In weniger geordneten Proben schwingen sie lokal in einer käfigartigen Umgebung umher oder durchmischen sich vorzugsweise bei hohen Temperaturen. Trifft ein Neutronenstrahl auf sich bewegende Atome, so ändert er nicht nur seine Richtung, sondern auch seine Geschwindigkeit. Das Instrument TOFTOF misst bei einem derartigen Experiment die Neutronenintensität und Änderung der Neutronengeschwindigkeit für unterschiedliche Streuwinkel. Man verwendet hierfür einen gepulsten Neutronenstrahl, dessen Ankunfts-

zeit an der Probe das Startsignal für die Flugzeitmessung festlegt. Das Stoppsignal wird durch die Ankunft der Neutronen in einem Detektor erzeugt. Aus der Ankunftszeit dort und dem Abstand des Detektors zur Probe wird die Geschwindigkeit des jeweiligen Neutrons bestimmt. Aber dieses Messergebnis liefert noch kein direktes Abbild der Atombewegungen in Raum und Zeit. Die einzelnen Bewegungsarten, wie Schwingung oder Diffusion, können erst durch den Vergleich mit physikalischen Modellen unterschieden werden.





Schwebender flüssiger Metalltropfen in der Probenkammer des Instruments TOFTOF.

Dynamik in der Schmelze

Nicht nur die Anordnung der Atome ist bedeutend für die Eigenschaften eines Materials, sondern auch ihre Dynamik. Wie schnell bewegen sich beispielsweise die Atome in einer metallischen Schmelze kurz vor dem Erstarren? Dies ist ein wichtiger Parameter bei Computersimulationen, die den Erstarrungsprozess von Metallschmelzen untersuchen, da er ganz wesentlich die Materialeigenschaften des späteren Werkstücks bestimmt.

Für die Untersuchung der Beweglichkeit von Atomen wurde das Spektrometer TOFTOF (Time Of Flight Time Of Flight) der Technischen Universität München optimiert. Die besondere Leistungsfähigkeit dieses Instruments zeigt sich beispielsweise bei Messungen der Diffusionsge-

schwindigkeit von flüssigem Nickel bei unterschiedlichen Temperaturen, die vom Deutschen Zentrum für Luft und Raumfahrt (DLR) Köln durchgeführt wurden. Sie reichen sogar bis zu 230 K unter den Gefrierpunkt. Diese Unterkühlung wird durch das völlig behälterfreie Schwebeschmelzverfahren mit induktiver Heizung erreicht. Die Probengröße ist hierbei jedoch auf circa 6 mm Durchmesser beschränkt. TOFTOF hat die nötige Intensität und Auflösung, um trotz kleiner Proben die atomare Diffusion in stark unterkühlten Schmelzen zu untersuchen. Wie bei Messungen in der Schwerelosigkeit des Weltraums ist das Ergebnis nicht durch den Einfluss der Schwerkraft (Konvektion) verfälscht. Da das Neutron mit dem sich bewegenden Atom nur kurz wechselwirkt, hat eine langsame Durchmischung der Schmelze keinen Einfluss auf die Messung.



Supraleitung unter der Lupe

Ist das „bunte“ Treiben in der Schmelze erst einmal vorbei, sitzen die Atome wohlgeordnet auf ihren Gitterplätzen und schwingen. Mit einem Dreiachsenspektrometer lassen sich diese Gitterschwingungen vortrefflich beobachten. Eine Gruppe des Max-Planck-Instituts für Festkörperforschung in Stuttgart hat am FRM II das Dreiachsenspektrometer TRISP (TRiple axis resonant SPin echo spectrometer) aufgebaut, welches diese Schwingungen sehr viel genauer misst als alle bisherigen Geräte dieser Art. Mit diesem Fortschritt

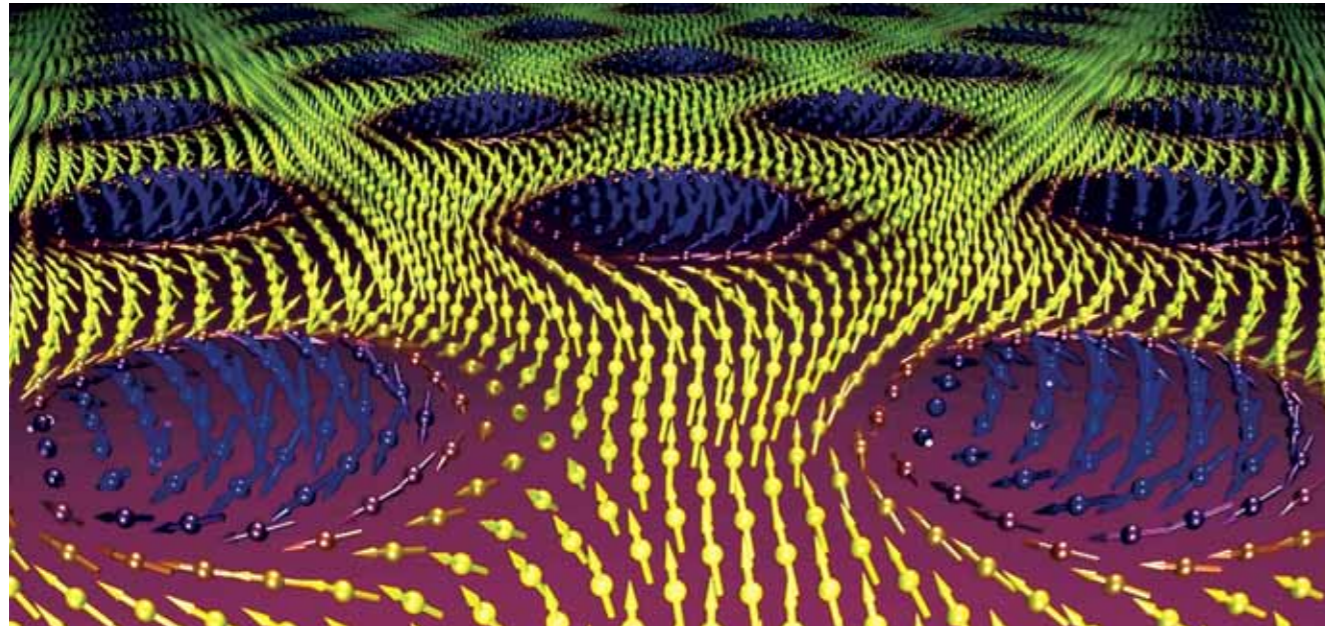
in der Messtechnik ist man der Ursache der Supraleitung auf der Spur. Bei der Supraleitung verbinden sich Elektronen zu den nach ihrem Entdecker Leon Neil Cooper (geb. 1930) benannten Cooper-Paaren, die Strom bei tiefen Temperaturen völlig widerstandslos transportieren. Nunmehr konnte am TRISP mit 100fach besserer Auflösung die Kopplung zwischen Elektronen und Gitterschwingungen ausgemessen werden. Dabei wurden bei Metallen, wie Blei oder Niob, neue Effekte beobachtet, die die maximale Temperatur der Supraleitung beeinflussen.

Bei der neuen so genannten Hochtemperatur-Supraleitung wird vermutet, dass die Paarung der Elektronen durch die kollektiven Schwingungen der magnetischen Momente der Atome beeinflusst wird.

Verwendet man einen Neutronenstrahl, in dem die Neutronen magnetisch einheitlich angeordnet sind (polarisierte Neutronen), so kann man nicht nur die Bewegung der Atome, sondern auch die der atomaren magnetischen Momente mit hoher Genauigkeit beobachten.



Höchstauflösendes Dreiachsenspektrometer TRISP in der Experimentierhalle.



Neutronen machen die magnetischen Wirbelfäden an der Oberfläche von Mangansilizium sichtbar.

Magnetismus in Isolatoren und Metallen

Nicht nur die Anordnung der Atome in einem Material kann mit den Neutronen sichtbar gemacht werden. Besitzen die Atome ein magnetisches Moment, vergleichbar mit einer winzigen Kompassnadel, so lassen sich Orientierung und Bewegung der magnetischen Momente mit Neutronen bestimmen. Eine so genannte ferromagnetische Ordnung (alle Momente zeigen in die gleiche Richtung) findet man beispielsweise in Eisen. Eine ganz neue magnetische Ordnung entdeckten Forscher der Technischen Universität München bei Experimenten am Instrument MIRA. In einem Kristall des Materials Mangansilizium fanden

sie eine Anordnung der magnetischen Momente in der Form von Wirbelfäden. Diese Wirbelfäden ordnen sich in einer regelmäßigen Struktur an, die nahezu unabhängig von der Anordnung der Atome ist. Wenn man diese Anordnung gezielt zu beeinflussen lernt, lassen sich daraus völlig neue Verfahren entwickeln, um mithilfe des Magnetismus Informationen zu speichern.

Die magnetischen Wirbelfäden sind aber noch aus ganz anderen Gründen interessant. Schon in den 50er Jahren des letzten Jahrhunderts hatte der Münchner Nobelpreisträger Werner Heisenberg (1901 – 1976) vorgeschlagen, nach einer Theorie der Bausteine des Universums zu suchen, die diese

Bausteine wie Knoten in einem Medium beschreibt. Diese Idee wurde vom britischen Physiker Tony Skyrme (1922 – 1987) gut ein Jahrzehnt später aufgegriffen – die von ihm vorgeschlagenen Teilchen werden deshalb Skyrmionen genannt. Rein mathematisch betrachtet sind die magnetischen Wirbel, die erstmals am FRM II entdeckt wurden, genau solche Skyrmionen.

Positronen finden Fehler

Auch die regelmäßige Anordnung der Atome auf einem Gitter hat Fehler. Bei hohen Temperaturen nahe dem Schmelzpunkt ist etwa jeder tausendste Platz nicht besetzt. Aber auch bei tiefen Tempe-



raturen treten derartige Fehlstellen auf, etwa bei der starken Verformung eines Metalls. Treten derartige Leerstellen lokal vermehrt auf, so kann es bei einer mechanischen Belastung des Materials zu einem Riss kommen. Diese Defekte sind jedoch aufgrund ihrer geringen Anzahl und Größe nur schwer auszumachen. Positronen agieren hier als Spürhunde. Sie werden in die zu untersuchende Probe geschossen und bewegen sich zwischen den Atomen, bis sie in einer gegebenenfalls vorhandenen Leerstelle eingefangen werden. Dort verweilen sie länger als im perfekten Gitter, bevor sie sich jeweils mit einem Elektron paaren und in Strahlung auflösen. Die so entstehenden Gamma-Strahlen geben Aufschluss über die Art und Anzahl der Defekte. So kann man beispielsweise unter zehn Millionen Atomen ein fehlendes nachweisen.

Die ausgeklügelten Messapparaturen an der weltstärksten neutroneninduzierten Positronenquelle NEPOMUC (**NE**utron induced **PO**sitron source **MU**nich) werden an der Technischen Universität München in Zusammenarbeit mit der Universität der Bundeswehr München entwickelt.

Die Positronen als Spürhunde können nicht nur Defekte erkennen, sondern auch Atomsorten unterscheiden. Beim Zerstrahlen mit einem Elektron erfahren die entstehenden Gamma-Strahlen eine Energieänderung, die wie ein Fingerabdruck spezifisch für das

jeweilige Element ist. So konnten die Forscher die Empfindlichkeit dieser Methode am NEPOMUC am Beispiel von Zinn in Aluminium

zeigen. Unter einer Schicht von 500 Aluminium-Lagen wurde eine einzelne Lage aus Zinn-Atomen zerstörungsfrei nachgewiesen.



Messapparaturen an der Positronenquelle NEPOMUC.



Ein Blick in die Vergangenheit

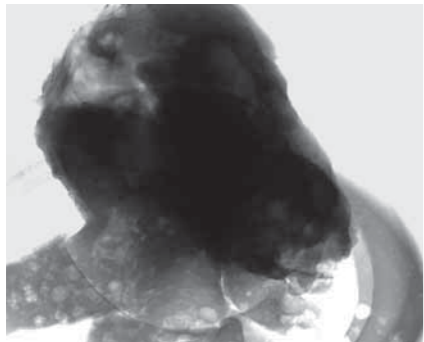
Neutronen geben auch Einblick in einzigartige historische Schätze. In Zusammenarbeit mit Archäologen und Museen untersuchen Physiker der Universität zu Köln am Instrument PGAA (Prompte Gamma Aktivierungs-Analyse), wie Kunstgegenstände gefertigt wurden und wie sie am effektivsten restauriert werden können.

Unter den Objekten befand sich eine mehrere Millionen Euro teure Bronzeplastik aus Florenz. Gefertigt hatte diesen Prophetenkopf der Bildhauer Lorenzo Ghiberti (1387 – 1455) in den Jahren 1425 bis 1442 für das Paradiestor des Baptisteriums gegenüber des Doms Santa Maria Del Fiore. Mit den Jahren war die Bronzeplastik

durch Ablagerungen schwarz geworden. Italienische Restauratoren reinigten sie mit zwei verschiedenen Methoden: Ein Teil wurde mit einem Laser gesäubert, ein anderer Teil des Prophetenkopfes auf chemische Weise mit Salzen. Um bewerten zu können, welche Methode die effektivere ist, lenkte man am PGAA die Neutronen so auf das Bronzestück, dass sie die Oberfläche lediglich streiften. Beim Einfall der Neutronen geben die verschiedenen Materialien des Kunstgegenstands ein charakteristisches Muster an Gamma-Strahlen ab. Dabei fand sich auf der mit Laser gereinigten Hälfte des Bronzekopfes vermehrt Chlor, das ein typischer Bestandteil der schwarzen Ablagerungen ist. Aus den Ergebnissen am PGAA konnten die Restauratoren in Italien schließen,

dass die chemische Methode, die weniger Chlor zurück ließ, die Bronzeoberfläche besser reinigt.

Für Restauratoren ist es nicht nur wichtig zu wissen, wie ein Gegenstand erhalten werden kann, sondern auch wie er gefertigt wurde. Hierzu gibt das PGAA bei der Durchleuchtung mit Neutronen (Radiografie) zusätzlich zur chemischen Analyse Aufschluss über das Innere von Gegenständen, ohne diese dabei zu zerstören. So entstand von der Ghiberti-Bronzeplastik ein Bild, das erstmals wichtige Details aus dem Inneren des massiven handtellergroßen Kunstwerks zeigte: Ein von Ghiberti erst nachträglich aufgefülltes Loch verweist auf einen ursprünglich fehlerhaften Guss, der so doch noch verwendet werden konnte.



Radiografie (oben) eines Bronzekopfes (rechts) vom Paradiestor des Baptisteriums (Seite 49) in Florenz. Der linke Teil des Kopfes wurde mit einer Lasertechnik gereinigt, der rechte mit einer chemischen Methode, die Mitte ist noch ungereinigt. Oben links ist in der Radiografie das aufgefüllte Loch sichtbar.





Großforschungszentren am FRM II

Weiche Materie im Fokus

Am Forschungszentrum Jülich (FZJ) wurde bis zum Mai 2005 eine leistungsstarke Neutronenquelle betrieben. Mit ihrer Stilllegung engagiert sich das FZJ mit einer großen Forschergruppe am FRM II und hat seine besten Instrumente am FRM II neu und erweitert aufgebaut. Zudem sind neuartige Instrumente des FZJ am FRM II bereits errichtet beziehungsweise befinden sich noch im Aufbau. Sie alle profitieren von der am FRM II deutlich höheren Strahlintensität. Das 2006 gegründete Jülich Centre for Neutron Science (JCNS) betreibt neben den Instru-

menten am FRM II auch Instrumente am Institut Laue-Langevin (ILL) in Grenoble, Frankreich, und an der Spallationsneutronenquelle SNS in Oak Ridge, USA.

Forschungsschwerpunkte des Jülicher Engagements in Garching sind weiche Materie und Magnetismus. Zum Forschungsgebiet weiche Materie zählen Kunststoffe und komplexe Flüssigkeiten wie Polymerlösungen oder auch Emulsionen.



Wissenschaftler und Ingenieure an der Kleinwinkelstreuapparatur des Jülich Centre for Neutron Science.



Innenansicht des Streurohrs am Reflektometer für biologische Proben REFSANS.



Plastik in Bewegung

Während man sich in einer metallischen Schmelze die Dynamik der Atome als Durchmischung von starren Kugeln vereinfacht vorstellen kann, ist die Bewegung von langen Polymerketten wesentlich komplexer. Selbst einfache Polymere, bestehend aus 100 bis 1000 aneinander gereihten Kohlenstoffatomen, behindern sich gegenseitig stark bei ihrer Bewegung. Um diese relativ langsame Diffusion untersuchen zu können, setzten Wissenschaftler vom JCNS ihr hochauflösendes Neutronen-Spin-

Echo-Spektrometer J-NSE ein. Sie fanden heraus, dass sich die Polymerkette in der Schmelze wie eine Schlange bewegt. Hierbei hat das Polymer in Richtung der Kette Geschwindigkeiten von einigen Zentimetern pro Sekunde, während es sich senkrecht zur Kettenrichtung kaum bewegt.

Waschmittel sparen

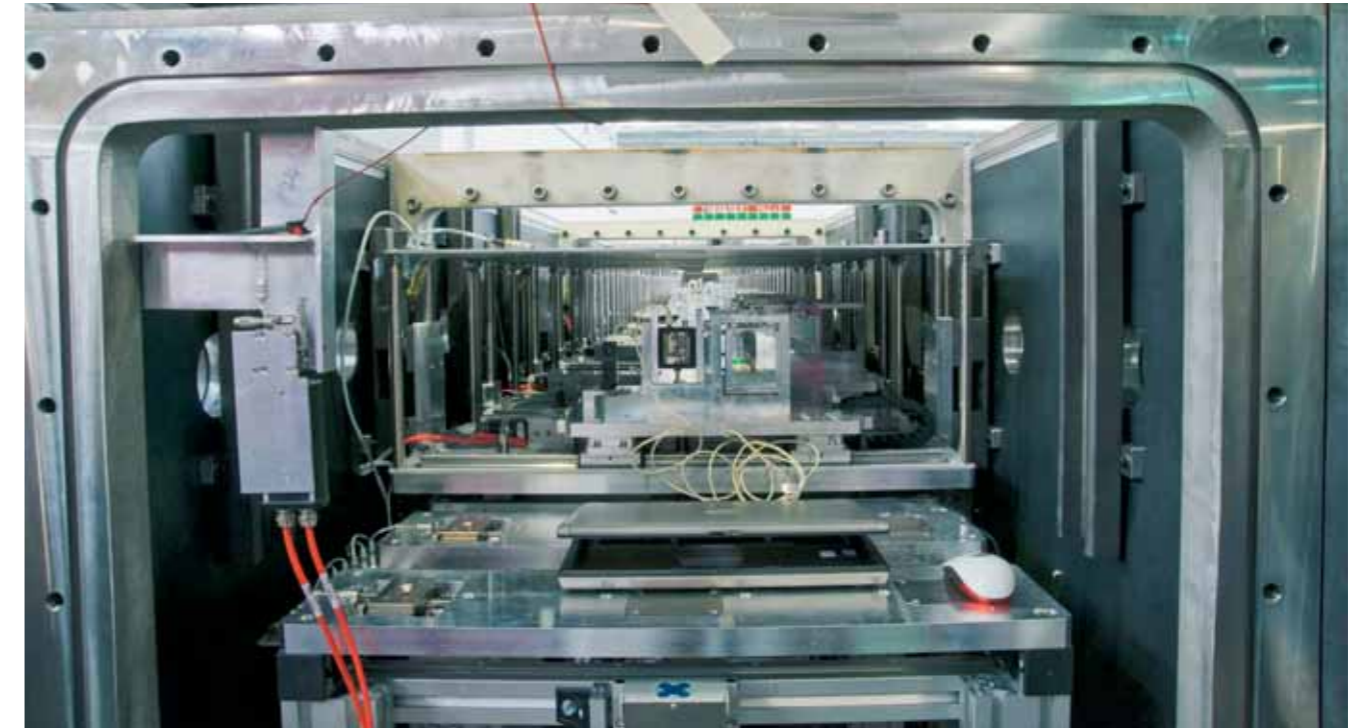
Tenside werden in unserem Alltagsleben vielseitig eingesetzt. In Wasch- und Reinigungsmitteln helfen sie beispielsweise,

Schmutzbestandteile, wie Öle und Fette, im Wasser zu lösen. Zu große Mengen im Abwasser belasten jedoch die Umwelt. Man benötigt weniger Tenside, wenn eine kleine Menge eines bestimmten Polymers hinzugegeben wird. Dieses von Jülicher und Kölner Forschern entdeckte Additiv ist wie das Tensid amphiphil, d.h. es gibt ein wasserliebendes und ein ölliebendes Ende des Moleküls. Diese Polymere sind fadenförmige Makromoleküle mit 30- bis 100facher Länge im Vergleich zum kurzen Tensidmolekül. Als Additiv sorgt dieses Polymer dafür, dass riesige Mengen an Tensiden eingespart werden können.

Dieser Effekt wurde mithilfe der Neutronenkleinwinkelstreuung untersucht. Sie kann die Struktur von Wasser, Öl, Tensid und Polymer innerhalb der Mischung präzise bestimmen, da Neutronen an verschiedenen Substanzen unterschiedlich gestreut werden. Jede der Substanzen enthält Wasserstoff, deshalb können sie für die Neutronen einzeln sichtbar gemacht werden. Tauscht man beispielsweise einen Teil des Wasserstoffs gegen Deuterium aus, so kann man gezielt die Anordnung des Additivs erkennen. Da dieses aber nur in einer sehr kleinen Menge in der Mischung vorhanden ist, wird für eine derartige Untersuchung eine Neutronenquelle mit höchster Intensität benötigt.



Durch Zugabe eines bestimmten Polymers erhöht sich die Löslichkeit von Öl in Wasser. Von links nach rechts: Öl und Wasser, Öl und Wasser mit Tensid, Öl und Wasser mit Tensid und 0,2 Prozent Polymer sowie Öl und Wasser mit Tensid und 0,5 Prozent Polymer.



Die Kleinwinkelstreuapparat der Technischen Universität München und des Forschungszentrums Geesthacht.

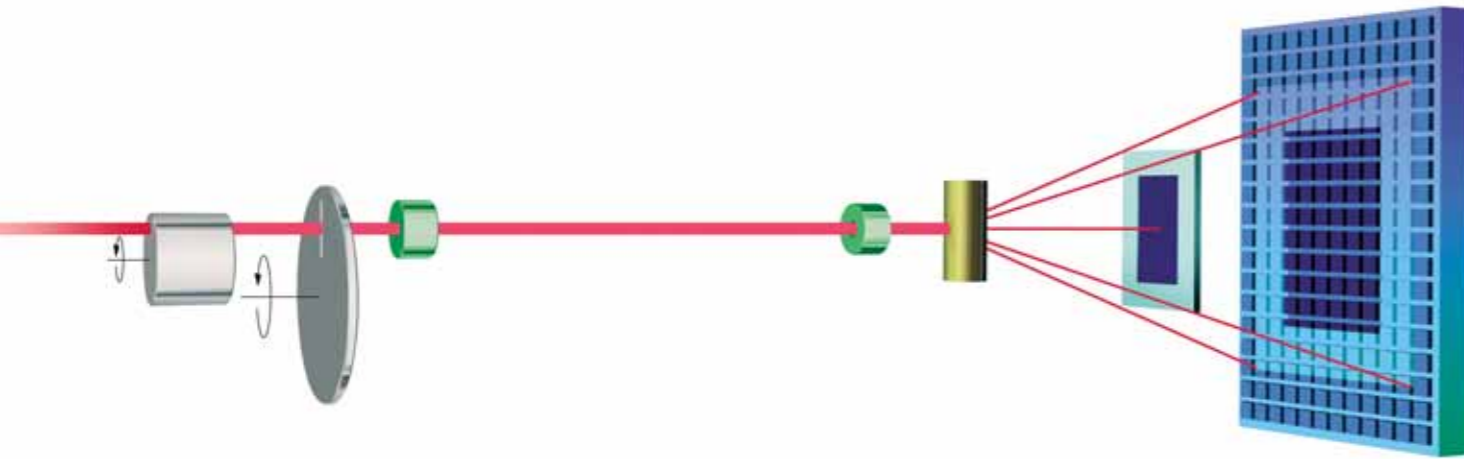
Zur Salzsäule erstarrt

Die Grundlagenforschung mit Neutronen verspricht auch auf medizinischem Gebiet neue Erkenntnisse. Ein Beispiel ist die Forschung zur Biomineralisation. Dieser Begriff umschreibt das gezielte Bilden von mineralischen An- und Ablagerungen in lebenden Organismen. Beim Menschen beispielsweise stellt sich die Frage, wie sich Mineralien in Knochen und Zähnen auf-, aber auch wieder abbauen, etwa bei der Osteoporose. Beim Menschen – wie bei allen anderen Säugetieren – ist zum Beispiel die Konzentration von

Kalziumphosphat im Körper so hoch, dass es ständig zu ungewollten Ablagerungen kommen kann. Das Protein Fetuin ist ein wichtiger Regulator dieser Kristallisation. Bei Mäusen mit zu geringer Fetuin-Konzentration hat man beobachtet, wie sich vorzeitig mit dem Alter Ablagerungen von Kalziumphosphat in den inneren Organen und dem restlichen Körper ausbilden. Ähnliches findet man auch bei Dialysepatienten.

Dieses Phänomen wird in der Fachliteratur nach der zur Salzsäule erstarrten Ehefrau Lots (1. Mose 19,30) auch als das „Lots

Weib“-Syndrom bezeichnet. Mit der Neutronenkleinwinkelstreuung kann der mikroskopische Mechanismus der Kristallisation in Gegenwart von Fetuin untersucht werden. Dieser Prozess dauert im Reagenzglas typischerweise Stunden und ist damit experimentell für die Neutronenstreuung sehr gut zugänglich. Das Protein lagert sich zunächst im Inneren der Kristalle und mit zunehmender Größe außerhalb an, um so das weitere Wachstum zu unterbinden. Der Ort der Anlagerung kann deutlich im Experiment nachgewiesen werden.



**Exkurs:
Blick in die Nanowelt**

Schon in den 60er Jahren wurde am Atom-Ei die Kleinwinkelstreuung mit Neutronen entwickelt. Inzwischen ist sie zu einer vielseitigen Streumethode geworden, die Strukturen in Flüssigkeiten und Festkörpern sichtbar macht, um die physikalischen Eigenschaften des Probenmaterials zu erklären. Hierbei beobachtet man nicht die Position einzelner Atome, sondern die von Nanopartikeln wie beispielsweise Proteinen mit vielen 100.000 Atomen oder Ausscheidungen in metallischen Legierungen von 1 bis 1000 Nanometer.

Bei der Kleinwinkelstreuung nutzt man wie bei der Bestimmung der Atompositionen, dass der Neutronenstrahl abhängig vom Abstand der Teilchen gebeugt wird. Während bei der Messung der kleinen

Atomabstände die Neutronen in relativ großen Winkeln im Bereich von 20 bis 160 Grad abgelenkt werden, betragen diese bei der Kleinwinkelstreuung aufgrund der größeren Partikel nur 1/1000 bis zu einigen Grad. Diese kleinen Winkel kann man nur über relativ große Entfernungen bestimmen, weshalb die Kleinwinkelstreuapparaturen etwa 40 Meter lang sind.

Die Nanopartikel bilden teilweise geordnete Strukturen oder verteilen sich regellos in der Probe. Mit der Kleinwinkelstreuung erhält man sowohl Aufschluss über ihre Anzahl, als auch ihre Form und Anordnung zueinander. Dieses entscheidet beispielsweise über die Festigkeit von Superlegierungen in Flugzeugturbinen. Die Neutronenkleinwinkelstreuung ist somit eine wesentliche Untersuchungsmethode für Entwicklungen im Bereich der Nanotechnologie.

Prinzip einer Kleinwinkelstreuapparatur: Der kontinuierliche Neutronenstrahl wird im Selektor (links) nach seiner Geschwindigkeit gefiltert, optional mit einer Scheibe gepulst und über eine Distanz von bis zu 20 Meter durch Blenden (grün) in seiner Richtung bestimmt. Er trifft dann auf die Probe (gelb), wodurch er in seiner Richtung abgelenkt wird. Die großflächigen Detektoren bestimmen mit hoher Auflösung die kleine Ablenkung des Neutronenstrahls.



Zellmembranen selbst gemacht

Ist die Funktionsweise nicht durch das Material selbst, sondern durch seine Oberfläche bestimmt, gibt die Methode der Reflektometrie Aufschluss. In der Reflektometrie wird die Spiegelung des Neutronenstrahls an einer Oberfläche untersucht, um zum Beispiel Auskunft über deren Eigenschaften, wie Schichtdicke, Rauigkeit oder Struktur zu erhalten. Besonders interessant sind Untersuchungen an dünnen Schichten, wie beispielsweise Modelle von biologischen Membranen. Am Instrument REFSANS (REFlectometer and Small Angle Neutron Scattering) untersuchen Forscher der Ludwig-Maximilians-Universität München (LMU) zusammen mit Kollegen vom GKSS-Forschungszentrum Geesthacht die Struktur und Funk-

tion von Lipidmembranen, aus denen die Zellwände von Lebewesen bestehen. Da die Dicke einer solchen Wand nur vier Nanometer beträgt, sind Neutronen mit einer Wellenlänge von circa einem Nanometer ideal geeignet. Für die Wechselwirkung einer Zellwand mit ihrer Außenwelt ist es wichtig, welche Moleküle eingebettet sind. Dies können beispielsweise Zucker-Lipide sein, die als Erkennungsmerkmal der Zelle für andere Zellen dienen. Um solche Wechselwirkungen zu studieren, versuchen die Forscher einzelne Merkmale der Zellwand auf einem Trägermaterial mit den entsprechenden Molekülen nachzubauen. Neutronen liefern den strukturellen Nachweis, wie gut das gelungen ist. Um die geringen Mengen der Zucker-Lipide sichtbar zu machen, werden teilweise Wasserstoff- durch Deuteriumatome

ausgetauscht, was den Kontrast zwischen den Lipiden erhöht.

Darüber hinaus ist es möglich, Änderungen in der Struktur der Membran zu beobachten, die durch verschiedene äußere Randbedingungen wie beispielsweise Temperatur, pH-Wert oder Ionenkonzentration hervorgerufen werden. Neben der Neutronenstreuung kommt am Instrument REFSANS auch die Mikroskopie als eine zentrale Methode der Biologie zum Einsatz. Wissenschaftler der LMU entwickeln Experimentierumgebungen, die es erlauben, die äußeren Randbedingungen zu kontrollieren und Experimente gleichzeitig mit Neutronen und einem Mikroskop durchzuführen.

Flach liegende Probe am Reflektometer REFSANS.





Instrumente in der Experimentierhalle:

- 1 Dreiachsenspektrometer mit kalten Neutronen PANDA, TU Dresden
- 2 Materialforschungsdiffraktometer STRESS-SPEC, HZB Berlin, GKSS Geesthacht und TU Clausthal
- 3 Radiografie und Tomografie mit kalten Neutronen ANTARES, TUM
- 4 Positronenquelle NEPOMUC, TUM und Universität der Bundeswehr München
- 5 Resonanz-Spinocho-Dreiachsenspektrometer TRISP, Max-Planck-Institut Stuttgart

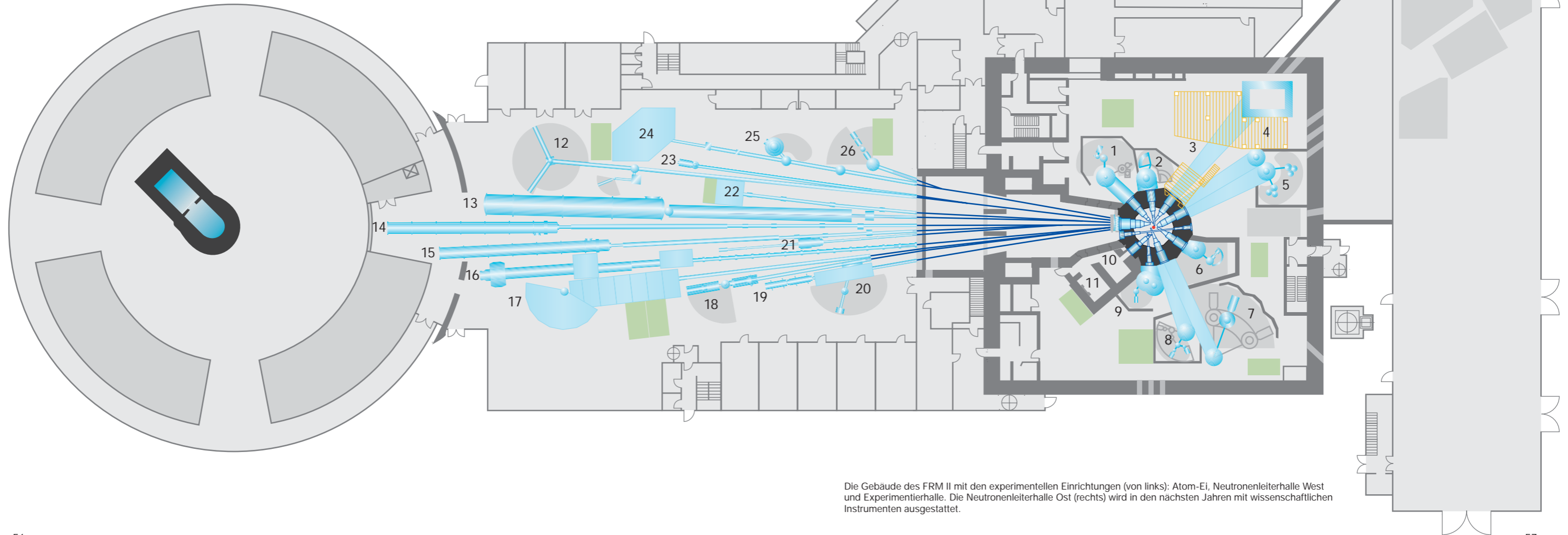
- 6 Dreiachsenspektrometer mit thermischen Neutronen PUMA, Universität Göttingen und TUM
- 7 Strukturpulverdiffraktometer SPODI, TU Darmstadt und LMU München
- 8 Einkristalldiffraktometer mit thermischen Neutronen RESI, Universität Augsburg und LMU München
- 9 Einkristalldiffraktometer mit heißen Neutronen HEiDi, RWTH Aachen
- 10 Medizinische Bestrahlungsanlage MEDAPP, TUM
- 11 Radiografie und Tomografie mit schnellen Neutronen NECTAR, TUM

Instrumente in der Neutronenleiterhalle West:

- 12 Resonanz-Spinocho-Spektrometer RESEDA, TUM
- 13 Kleinwinkelstreuapparat SANS-1, GKSS Geesthacht und TUM
- 14 Kleinwinkelstreuapparat KWS 1, FZ-Jülich
- 15 Kleinwinkelstreuapparat KWS 2, FZ-Jülich
- 16 Reflektometer REFSANS, GKSS Geesthacht und LMU München
- 17 Flugzeitspektrometer TOFTOF, TUM
- 18 Spinocho-Spektrometer J-NSE, FZ-Jülich

- 19 Teilchenphysik mit kalten Neutronen MEPHISTO, TUM
- 20 Neutronen-Röntgen-Kontrast-Reflektometer N-REX*, Max-Planck-Institut Stuttgart
- 21 Kleinwinkelstreuapparat KWS 3, FZ-Jülich
- 22 Prompte γ -Aktivierungsanalyse PGAA, TUM und Universität zu Köln

- 23 Reflektometer für magnetische Schichtsysteme MARIA, FZ-Jülich
- 24 Rückstreu-Spektrometer SPHERES, FZ-Jülich
- 25 Diffuse Neutronenstreuung DNS, FZ-Jülich
- 26 Messapparatur für langwellige Neutronen MIRA, TUM



Die Gebäude des FRM II mit den experimentellen Einrichtungen (von links): Atom-Ei, Neutronenleiterhalle West und Experimentierhalle. Die Neutronenleiterhalle Ost (rechts) wird in den nächsten Jahren mit wissenschaftlichen Instrumenten ausgestattet.



Von der Forschung zur industriellen Anwendung

Am FRM II ist es nur ein kleiner Schritt von der Grundlagenforschung in den Materialwissenschaften hin zur anwendungsorientierten Forschung und der Anwendung selbst. Dabei nutzen immer mehr Unternehmen die Neutronenquelle. Die Ansiedlung der europäischen

nommen werden. Entsprechend eingeschränkt war der Erkenntnisgewinn. Mit der Entdeckung der Röntgenstrahlen wurde es möglich, zerstörungsfrei das Innere von Gegenständen sichtbar zu machen. Neutronen erweitern nun diesen Blick tief in die Materie hinein. Ihr besonderer Vorteil bei



Hochauflösende Radiografie eines Motors (links) und einer Rattenlunge (oben). Die Radiografie der Rattenlunge hilft, Geräte zur künstlichen Beatmung zu verbessern.

ganzen Serie von Aufnahmen lässt sich dann ein dreidimensionales Abbild (Tomografie) erstellen. In einem interdisziplinären Projekt mit Medizinern, Maschinenbauern und Physikern von der TUM und der Universität Freiburg wurde die Struktur einer Lunge untersucht. Ziel ist es, die Geräte zur künstlichen Beatmung von Patienten zu verbessern. Um die Beatmungsfunktion zu simulieren, muss der genaue Aufbau der Verästelung der Luftkanäle bekannt sein. Am Beispiel einer Rattenlunge konnte diese Verästelung bis zur siebten Hierarchie-Ebene am Instrument ANTARES bestimmt werden.

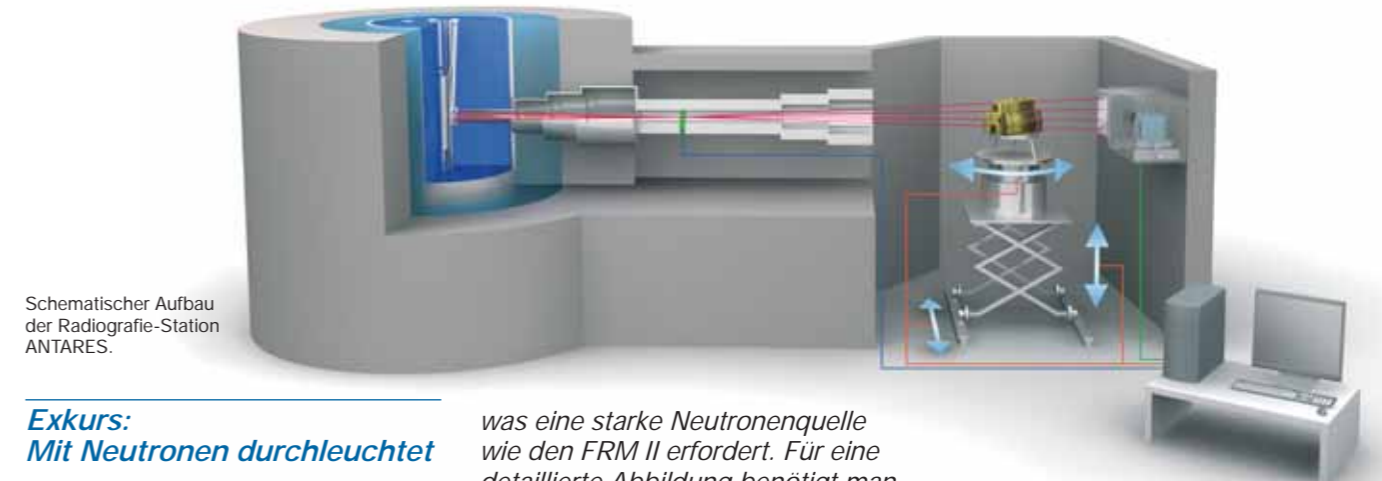


Forschungsabteilung von General Electric ist nur das spektakulärste Beispiel dafür, dass der Campus Garching ein Standortfaktor für die Region im Norden von München und darüber hinaus für ganz Bayern ist.

Innenansichten in 3D

Um in sein Inneres zu blicken, musste ein Gegenstand früher zerstört oder auseinanderge-

einer Durchstrahlung (Radiografie) von komplexen Objekten ist der Kontrast zwischen wasserstoffhaltigen Materialien, wie Kleber oder Schmierstoffen, und Strukturmaterialien, wie Metallen. So lässt sich in einem massiven Motorblock bei laufendem Betrieb die Ölschmierung im Millisekundentakt beobachten. Ein noch besseres Verständnis vom inneren Aufbau bekommt man, wenn man das Objekt von unterschiedlichen Seiten durchleuchtet. Aus einer



Schematischer Aufbau der Radiografie-Station ANTARES.

Exkurs: Mit Neutronen durchleuchtet

Auf den ersten Blick ist die Durchleuchtung von technischen Objekten mit Neutronen eine triviale Angelegenheit. Sie funktioniert wie eine einfache Lochkamera. Auch hier wird die Bildschärfe durch die Wahl der Blende (Lochgröße) bestimmt. Eine kleine Blendenöffnung (D) lässt jedoch nur wenige Neutronen auf das Objekt treffen,

was eine starke Neutronenquelle wie den FRM II erfordert. Für eine detaillierte Abbildung benötigt man nur noch einen großen Abstand (L) des Objekts zur Blende. Das Verhältnis der beiden Größen (L/D) bestimmt die Auflösung der Radiografie. Am Instrument ANTARES können Strukturen von bis zu 20 Mikrometer sichtbar gemacht werden. Hierfür befindet sich ein Leuchtschirm direkt hinter dem Objekt, der die Neutronen in

sichtbares Licht umwandelt, das dann wiederum von einer hoch empfindlichen Kamera registriert wird. Bei einer schnellen Abfolge von registrierten Bildern kann man dynamische Vorgänge wie einen laufenden Motor beobachten.

Materialentwicklung für die Technik

In Zusammenarbeit mit General Electric (GE) untersuchten Forscher des FRM II an den Instrumenten SPODI und STRESS-SPEC die Atomanordnungen in Eisen-Kobalt-Legierungen. Diese werden als leistungsfähige Magnete in Motoren und Generatoren eingesetzt. Durch geringe Zusätze von weiteren Metallen wie Mangan, Platin, Palladium, Rhenium oder Iridium sollten die mechanischen Eigenschaften der Legierungen verbessert werden, die positiven magnetischen allerdings



Materialuntersuchung am Instrument STRESS-SPEC.

bewahrt bleiben. Für die mechanischen Eigenschaften ist es wichtig, wie sich in den Eisen-Kobalt Legierungen eine bestimmte Ordnung der Atome einstellt. Da Eisen und Kobalt als benachbarte Elemente im Periodensystem nahezu gleich schwer sind, können sie nur sehr schwer von Röntgenstrahlen unterschieden werden, was die Beobachtung einer geordneten Phase nahezu unmöglich macht. Neutronen liefern hingegen einen guten Kontrast, sodass mit hoher Genauigkeit die Atomanordnung mit Änderung der Temperatur bestimmt werden konnte.



Die Nadel im Heuhaufen

Die Neutronenaktivierungsanalyse (NAA) ist ein sehr genaues Verfahren, um die Zusammensetzung einer Probe zu bestimmen. Selbst kleinste Verunreinigungen lassen sich mit dieser Methode nachweisen, die in vielen Fällen wesentlich empfindlicher ist als beispielsweise eine klassische chemische Analyse. Abhängig von der chemischen Zusammensetzung der Proben kann die NAA sogar ein Atom unter einer Billion anderer entdecken.

Die Probe wird dazu mit einem hohen Neutronenfluss direkt im Moderatortank bestrahlt, wobei einige Atome durch Neutroneneinfang radioaktiv werden. Dieses radioaktive Signal kann durch die dabei entstehende Gamma-Strahlung

empfindlich nachgewiesen werden und ist für jedes radioaktive Isotop charakteristisch. Aus der Intensität der Gamma-Strahlung lässt sich außerdem die Konzentration des jeweiligen chemischen Elements in der Probe bestimmen.

Diese Methode wird beispielsweise in der Umweltanalyse eingesetzt, um nachzuweisen, dass gesetzliche Grenzwerte bei der Schadstoffabgabe nicht überschritten werden. So wurden am FRM II Abluftfilter der Produktionsanlage eines Chemiekonzerns untersucht, um herauszufinden, welche Stoffe von ihnen zurückgehalten wurden. Mehrere Filter eines Abluftkamins sind hintereinander angeordnet, sodass die Konzentration eines Schadstoffes, z.B. Quecksilber, der im Filter hängen bleibt, von innen nach außen

abnimmt. Von der Konzentration im ersten dieser Filter kann man auf die ursprünglich vorhandene Menge des Schadstoffes rückschließen. Die Differenz zwischen der Konzentration im ersten und im letzten Filter zeigt an, ob und wie viel Schadstoff schließlich in die Umgebungsluft abgegeben wurde. Die Neutronenaktivierungsanalyse ergab in diesem Fall, dass die strengen Grenzwerte deutlich unterschritten wurden.



1. Präparation der zu bestrahlenden Probe.



4. Über die Rohrpostanlage (im Bild links) wird die Probe in die Bestrahlungsposition im Moderatortank.



7. Auswerten der Daten am Computer. Das Ergebnis erhält der Kunde per Email.



2. Einstellung der Bestrahlungszeit an der Kontrollstation.



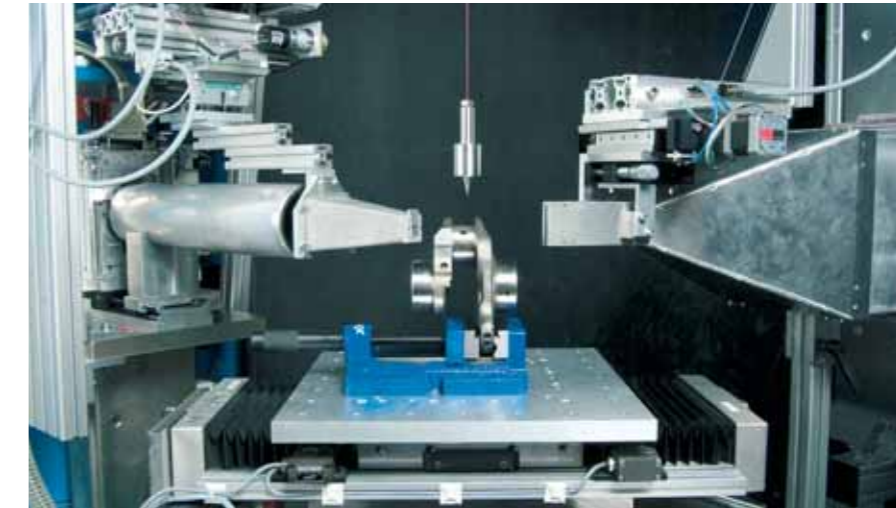
3. Einsetzen der Probenkapsel in die Rohrpostanlage.



5. Vorbereiten der Probe für die Messung am Institut für Radiochemie nach der Bestrahlung am FRM II.



6. Messung der Gammastrahlung, die von der radioaktiven Probe ausgeht.



Innere Spannungen

Bei mechanisch stark belasteten Bauteilen wie beispielsweise Verdichterrädern von Turbinen, die Flüssigkeiten und Gase auf hohen Druck bringen, kann es nach langem Einsatz zu Materialermüdung und schlimmstenfalls sogar zu einem Bruch kommen. Ursache dafür können innere Spannungen im Werkstück sein, wie sie bei nahezu jedem Umformprozess entstehen. Um diese Spannungen sichtbar zu machen, haben Wissenschaftler des Helmholtz-Zentrums Berlin am Instrument STRESS-SPEC ein spezielles Prüfverfahren entwickelt. Damit können sie mit Neutronen sogar tief im Inneren von großen Bauteilen versteckte Spannungen nachweisen.

Mit den Neutronen messen sie in den Materialien die Abstände der Atome, die sich aufgrund von äußerer Last oder inneren Kräf-

ten ändern. Aus der Änderung der Atomabstände im Vergleich zu einer nicht belasteten Referenzprobe lassen sich direkt die Spannungen im Werkstück sichtbar machen. Wegen der hohen Eindringtiefe sind Neutronen unschlagbar im zerstörungsfreien Ausmessen innerer Spannungen. Dieses Verfahren wurde auch erfolgreich bei der Optimierung einer Lastwagenkurbelwelle angewandt, bei der im Prüfstand wiederholt Risse am Rand des inneren Ölkanals aufgetreten waren. Mit dem Neutronenstrahl wurde jeweils ein ca. 2 mm³ großes Messvolumen tief im Inneren einer noch intakten Kurbelwelle untersucht. Aus einer Vielzahl von Messungen lässt sich dann der dreidimensionale Spannungsverlauf bestimmen. Ein daraufhin optimiertes Schmiede- und Nachbehandlungsverfahren verhinderte die Rissbildung, indem die inneren Spannungen dort verringert wurden.

Messen der Eigenspannung einer Kurbelwelle (oben) und eines Verdichterrads (unten) am Instrument STRESS-SPEC.





Wie Phosphor ins Silizium kommt

Silizium wird als Basismaterial für den Bau von Halbleiterbauelementen wie Transistoren oder Dioden verwendet. Bei großen elektrischen Leistungen, wie sie zum Beispiel in der Energieversorgung, aber auch in der Antriebstechnik geregelt werden müssen, werden entsprechend großvolumige Transistoren und Dioden verwendet. Das Silizium in derartigen Bauelementen muss eine sehr homogene elektrische Leitfähigkeit aufweisen, da Schwankungen bei den extrem hohen Strömen zu einer Überlastung des Bauteils führen könnten. Die erforderliche gleichmäßige Leitfähigkeit wird durch eine entsprechende Zugabe von Fremdatomen erreicht. Am FRM II geschieht diese Dotierung durch Neutronentransmutation: Siliziumatome fangen Neutronen

ein und wandeln sich über einen radioaktiven Zerfall in stabilen Phosphor um, der die benötigte Fremdatombeimischung liefert. Da die Neutronen tief in das Siliziummaterial eindringen, entsteht eine sehr gleichmäßige Dotierung über das gesamte Volumen. Im Vergleich zur chemischen Dotierung liefert diese Methode eine wesentlich homogenere Verteilung der Phosphoratome.

Die Bestrahlung der zylindrischen Siliziumblöcke mit maximal 20 cm Durchmesser und 50 cm Höhe findet im Moderatortank statt. Der Bestrahlungsort ist so gewählt, dass der Anteil von schnellen Neutronen verschwindend gering ist. Diese würden durch ihre hohe Energie Defekte im Silizium erzeugen. Der FRM II veredelt im Auftrag von Firmen pro Jahr circa zehn Tonnen des stark nachgefragten dotierten Siliziums höchster Qualität.



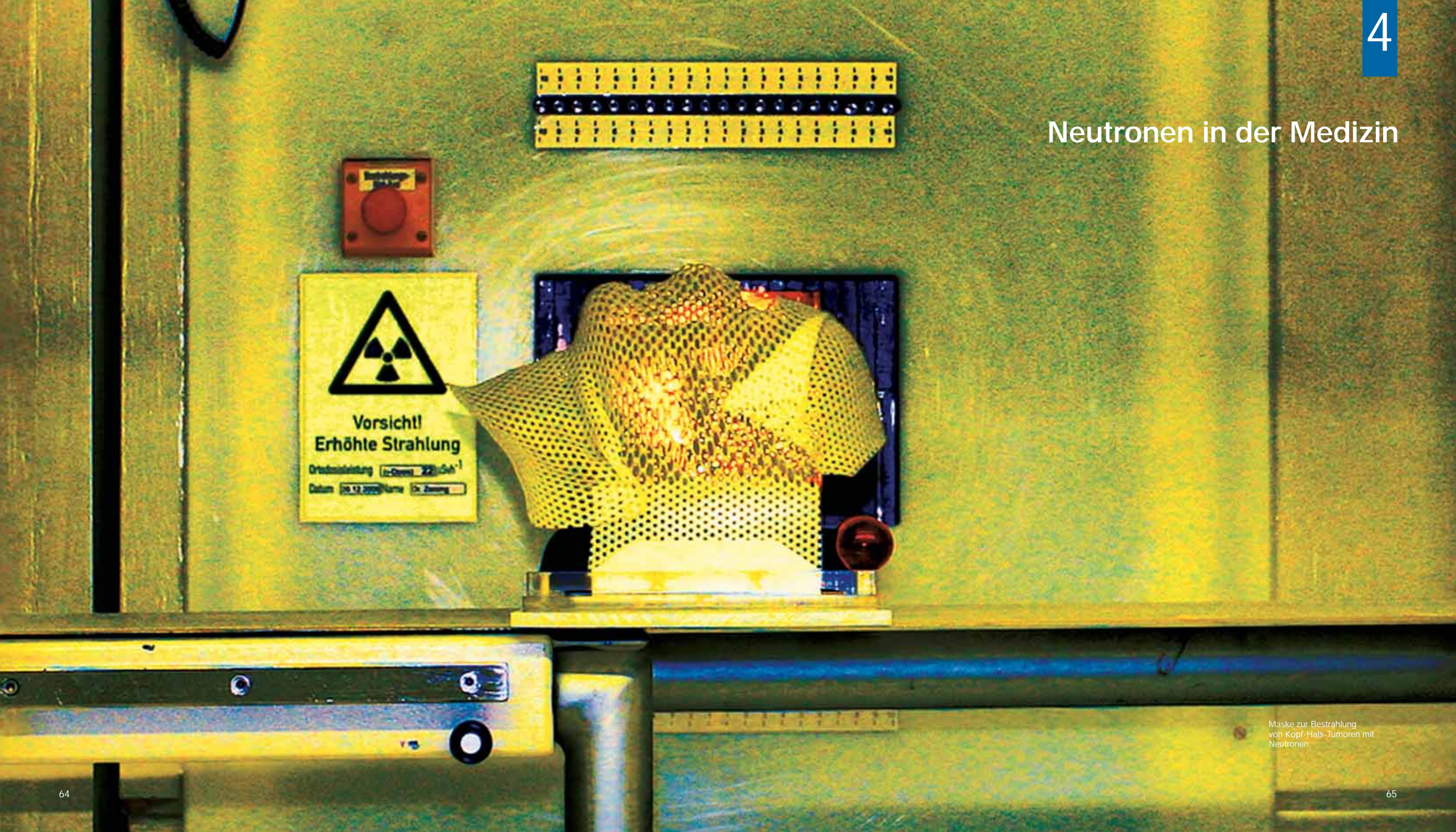
Das fertige Produkt: Siliziumblock nach der Dotierung durch Neutronen.

Transport eines Siliziumblocks zur Bestrahlungsposition.



Der bestrahlte Siliziumkristall wird aus dem Reaktorbecken gehoben.

Neutronen in der Medizin




**Vorsicht!
Erhöhte Strahlung**
Ortsdosisleistung $[\mu\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1}]$
Datum Name

Maske zur Bestrahlung von Kopf-Hals-Tumoren mit Neutronen.



Mit Neutronenstrahlen gegen Tumoren



Bestrahlungsraum für schnelle Neutronen am FRM II: Auf der Liege kann der Patient optimal im Neutronenstrahl positioniert werden.

Die moderne Radioonkologie (Behandlung von Krebs durch Bestrahlung) ist eine tragende Säule der Krebstherapie. Etwa die Hälfte aller Krebskranken wird heute geheilt. Von den Geheilten hatten sich 70 Prozent einer Strahlentherapie entweder als alleiniger Behandlungsform oder in Kombination mit einem operativen Eingriff oder einer Chemotherapie oder beidem unterzogen. Die Strahlentherapie spielt auch in der palliativen, das heißt der Beschwerden lindernden Krebsbehandlung, die nicht mehr auf Heilung zielt, eine bedeutende Rolle. Bei unheilbar erkrankten Patienten kann sie eine Lebensverlängerung und eine Besserung der Lebensqualität, z. B. durch Schmerzbeseitigung oder Wiederherstellen von Körperfunktionen (Gefähigkeit, Schlucken etc.) bewirken.

Die Strahlentherapie stellt, vergleichbar einem chirurgischen Eingriff, eine lokale Therapiemaßnahme dar. Eventuelle Nebenwirkungen beschränken sich im Wesentlichen auf die bestrahlte Körperregion.

Üblicherweise treffen bei der Behandlung Röntgenstrahlen auf den Tumor. Für ganz bestimmte Krebsarten sind jedoch Neutronenstrahlen geeignet. Die für die wissenschaftlichen Experimente verwendeten heißen, thermischen oder kalten Neutronen dringen jedoch nicht weit genug in den menschlichen Körper ein. Für die Tumorthherapie sind schnelle Neutronen erforderlich, wie sie direkt bei der Kernspaltung entstehen. Diese werden in einer weltweit einzigartigen Konverteranlage erzeugt. Bereits seit den 1980er Jahren wenden Mediziner diese

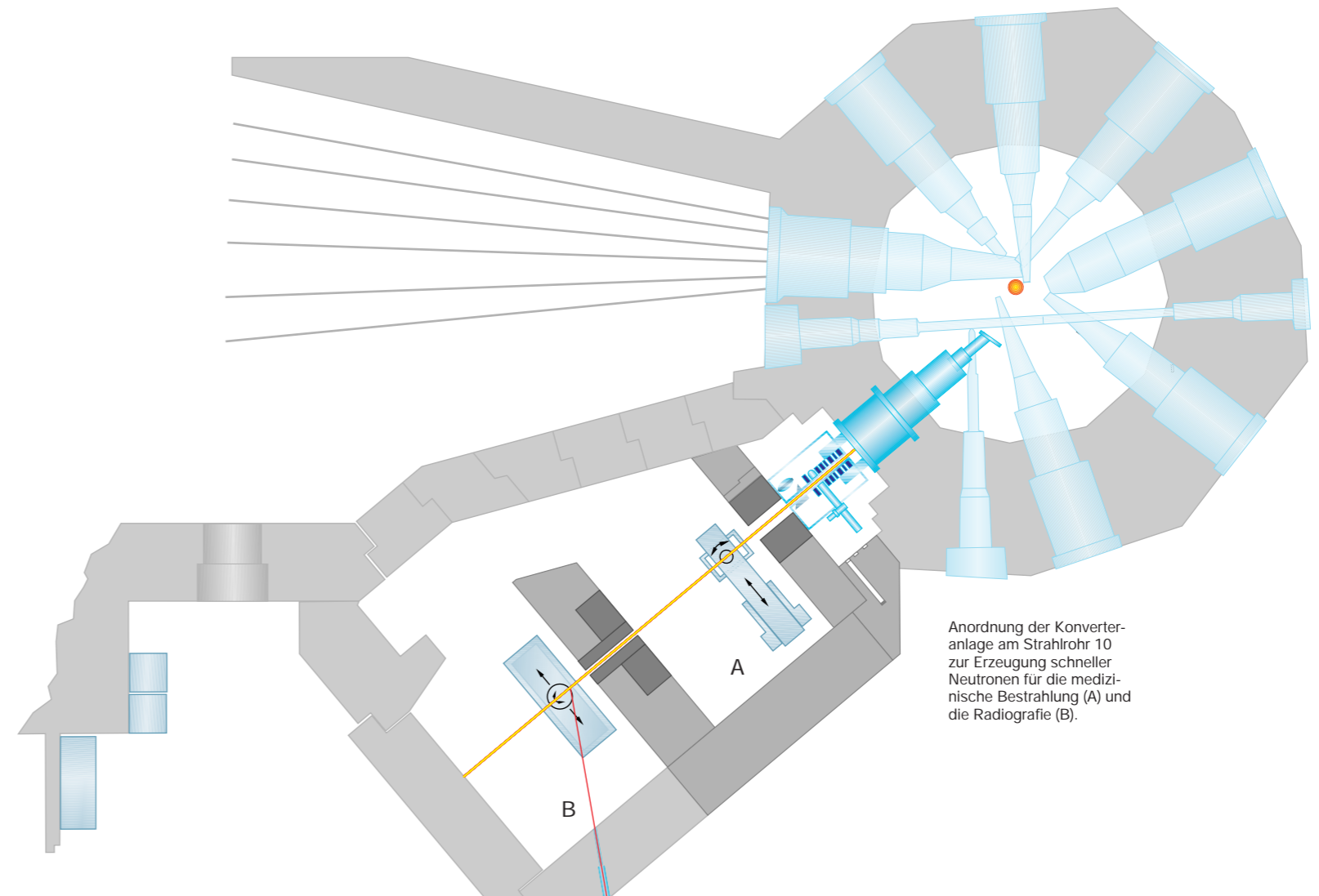


Methode am FRM, damals noch im Atom-Ei, an.

Die biologische Wirkung energiereicher Strahlung beruht vor allem auf der Schädigung der Erbsubstanz, also der DNS der Krebszelle. Nur bei einer hohen Strahlendosis entstehen ausreichend viele DNS-Schäden, die nicht mehr reparabel sind. Aus nicht reparierten Veränderungen der DNS resultiert der Verlust der Teilungsfähigkeit

der Zelle. Verlieren die Krebszellen die Fähigkeit der Zellteilung und Zellvermehrung, sterben sie ab. Letztlich bedeutet dies die Vernichtung des Tumors.

Neutronenstrahlen besitzen eine wesentlich höhere biologische Wirksamkeit als Röntgen- oder Gamma-Strahlung. Bereits wenige Neutronen können bei Wechselwirkung mit der DNS durch die erheblich höhere Häufigkeit an



Anordnung der Konverteranlage am Strahlrohr 10 zur Erzeugung schneller Neutronen für die medizinische Bestrahlung (A) und die Radiografie (B).



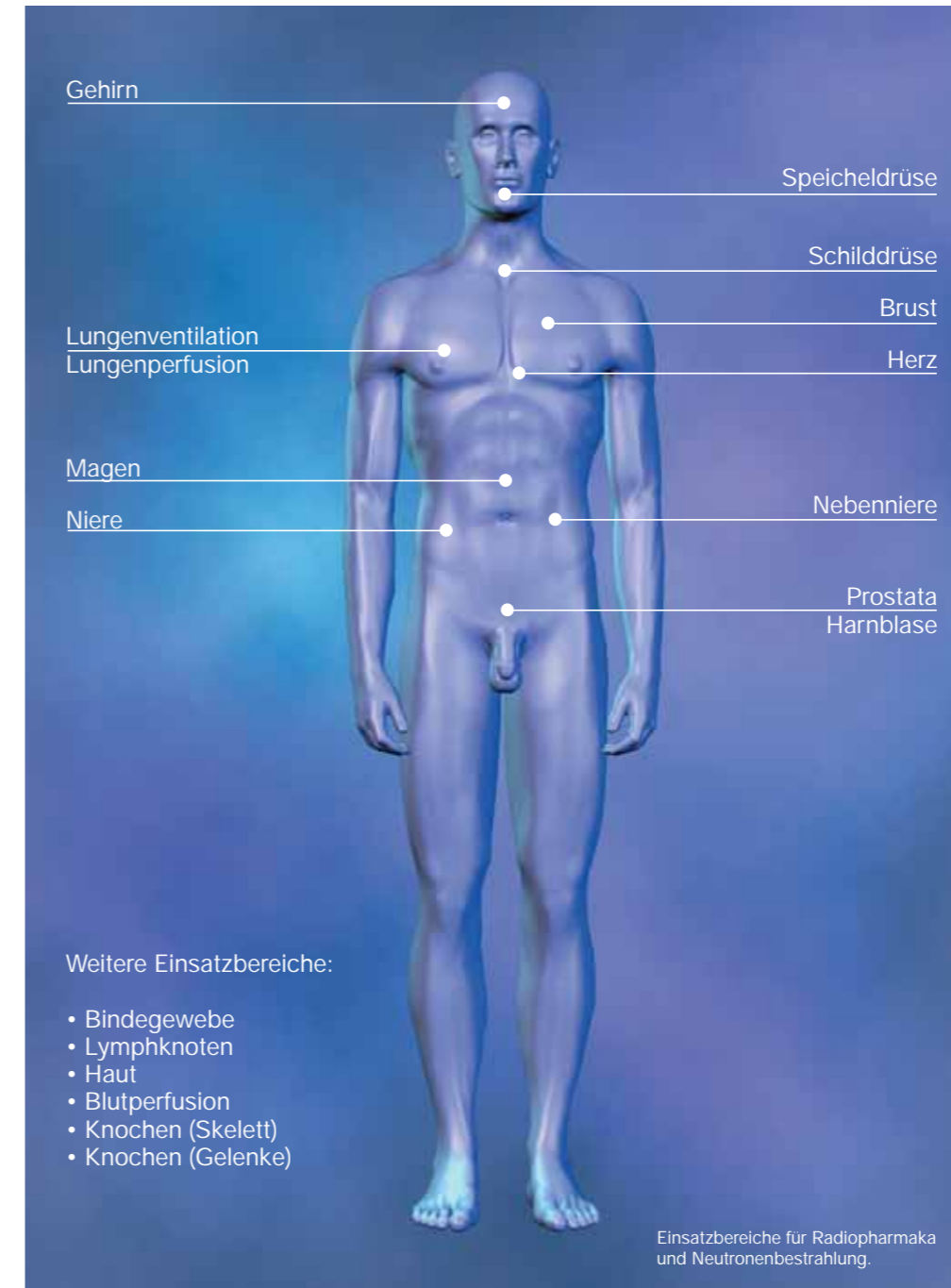
irreparablen Schäden eine Tumorzelle abtöten. Im Vergleich erzeugen Neutronen etwa zehn Mal mehr nicht reparierbare DNS-Veränderungen. Neutronen stellen somit eine sehr effiziente Therapieoption dar.

Aufgrund ihres Energiespektrums haben die Neutronen aus der Konverteranlage am FRM II bei der Zellvernichtung die höchste biologische Wirksamkeit der derzeit zur Krebsbehandlung eingesetzten Neutronenstrahlen. Trotz ihrer hohen Energie bleibt ihr Einsatz wegen ihrer begrenzten Eindringtiefe in den menschlichen Körper – in 5 cm Tiefe nur noch 50 Prozent der Dosis im Vergleich zur Körperoberfläche – auf die oberflächennahen Tumoren beschränkt. Dies hat aber auch einen positiven Effekt: Tiefer gelegenes gesundes Gewebe wird geschont. Neutronen bieten insbesondere bei Tumoren Vorteile, die schlecht mit Blut und Sauerstoff versorgt sind. Bei Behandlung mit Röntgenstrahlen sind sauerstoffarme Tumore im Unterschied zu normal oxygenierten (versorgten) erheblich weniger empfindlich. Vergleichbares gilt für langsam wachsende Tumore. In der Strahlentherapie mit Neutronen spielt die Abhängigkeit der Wirksamkeit von der Sauerstoffversorgung hingegen keine wesentliche Rolle.

Für Patienten mit Speicheldrüsenkarzinomen ist die Behandlung mit Neutronen von besonderem Vorteil. Sie reduziert deutlich das

Risiko eines lokalen Rezidivs (Rückfall). Aber auch die auf Palliation ausgerichtete Neutronentherapie hat einen hohen Stellenwert. Sie ist eine zusätzliche Behandlungsmöglichkeit in folgenden Krankheitssituationen: fortgeschrittener Brustkrebs an der Thoraxwand, Rezidivtumore inklusive Lymphknotenmetastasen im Halsbereich, bei Tumoren der Hals-Nasen-Ohren-Region sowie Krebserkrankungen und Rezidivtumore der Haut und der Weichteile (Sarkome). Therapieresistente größere Karzinome der Haut, vor allem auch maligne Melanome, aber auch die anderen genannten Krebsarten reagieren empfindlich auf eine Strahlenbehandlung mit Neutronen. Häufig sind bei Rückfällen die üblichen Behandlungsmethoden bereits ausgeschöpft oder es kommt nur noch ein verstümmelnder operativer Eingriff infrage. Die Neutronentherapie bietet hier die Chance auf lokale Tumorkontrolle oder -rückbildung, zumindest aber den zeitweiligen Stopp des Tumorwachstums.

Am Atom-Ei wurden bis zu seiner Abschaltung im Jahr 2000 durchschnittlich 60 – 80 Patienten pro Jahr behandelt. Von den insgesamt rund 700 Patienten hatten 34 Prozent Kopf-Hals-Tumoren, 26 Prozent Mammakarzinome, 12 Prozent Speicheldrüsenkarzinome, 11 Prozent maligne Melanome und 11 Prozent Weichteilsarkome. Die Verträglichkeit der Behandlung ist statistisch betrachtet gut. Bei keinem der Patienten mit z.B.



Mammakarzinom oder malignem Melanom führte die Neutronenbestrahlung zu einer schweren dauerhaften Komplikation. Als Nebenwirkung wurde am häufigsten eine entzündliche Reizung der bestrahlten Haut beobachtet, welche im Allgemeinen nach Therapieabschluss abheilte.

Die Strahlentherapie mit Neutronen am Forschungsreaktor in Garching ist von hohem Nutzen bei einer größeren Zahl von palliativ und bei einer kleineren Zahl von kurativ zu behandelnden Patienten. Bei den bisher behandelten Patienten ließen sich bei guter Langzeitverträglichkeit beachtliche Erfolge erzielen. Die Rate unerwünschter massiverer Behandlungsfolgen war gering und nicht höher als bei anderen Formen der Krebstherapie.

Im Vergleich zum Atom-Ei erlaubt die neue Forschungs-Neutronenquelle FRM II seit 2007 die Behandlung von mehr Patienten unter günstigeren Bedingungen. Zum einen ist der Neutronenstrahl vergleichsweise intensiver. Zum anderen lässt er sich flexibler an den jeweiligen Tumor anpassen, sodass eine kürzere Bestrahlungszeit ausreicht. Zudem ermöglicht das größere Behandlungsfeld von maximal 20 x 30 cm eine gleichmäßige Bestrahlung des krebserkrankten Gebietes. Der Patient kann in einem größeren Bestrahlungsraum besser zum Neutronenstrahl hin ausgerichtet werden. Damit ist die Behandlung am FRM II noch zielgenauer.



Radiopharmaka vom FRM II

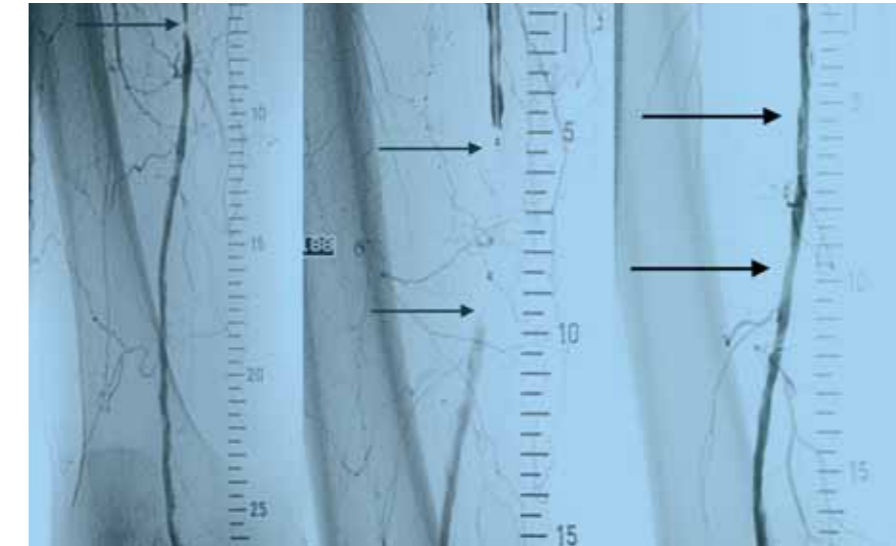
Zur medizinischen Diagnose und Therapie werden häufig radioaktive Isotope verwendet. Ärzte nutzen die Strahlung der Radioisotope aus, um etwa Tumore im Körper sichtbar zu machen oder gezielt schädliches Gewebe zu zerstören. Forschungsreaktoren mit hohem Neutronenfluss sind unabdingbar für die Herstellung von Radioisotopen. Auf dem Gelände des FRM II ist für die Weiterverarbeitung zu medizinischen Produkten ein industrielles Anwenderzentrum errichtet worden. Hier entwickelt und vermarktet beispielsweise die Firma Isotopen Technologien München AG (itm) entsprechende Radiopharmaka.

Radioisotope, die am FRM II produziert werden, helfen gegen Knochentumore, Bauchspeichel-

drüsenkrebs oder wiederholte Gefäßverengung. Sie weisen die für die Medizin geeigneten kurzen Halbwertszeiten mit minimalen Nebenwirkungen auf. Ein solches radioaktives Isotop ist Lutetium 177 (Lu 177). Es wird an Antikörper gekoppelt, um im Körper gezielt Tumorzellen am Krankheitsherd abzutöten. Das am FRM II von der Firma itm durch ein neues Verfahren hergestellte Isotop Lu 177 ist trägerfrei, das heißt nicht durch andere Isotope desselben Elements verunreinigt (bis zu 1000fach reiner). Es lagert sich in hoher Konzentration an die Krebszellen an. Es kann für die Behandlung von Krebsarten wie Non-Hodgkin, Knochentumoren oder Bauchspeicheldrüsenkrebs eingesetzt werden.



Nach der Bestrahlung im Reaktorbecken werden die teils hochradioaktiven Proben sicher für die Weiterverarbeitung vorbereitet.



Arterienverengung vor (links) und nach (rechts) der Behandlung durch Gefäßaufweitung und Bestrahlung mit Rhenium-188.

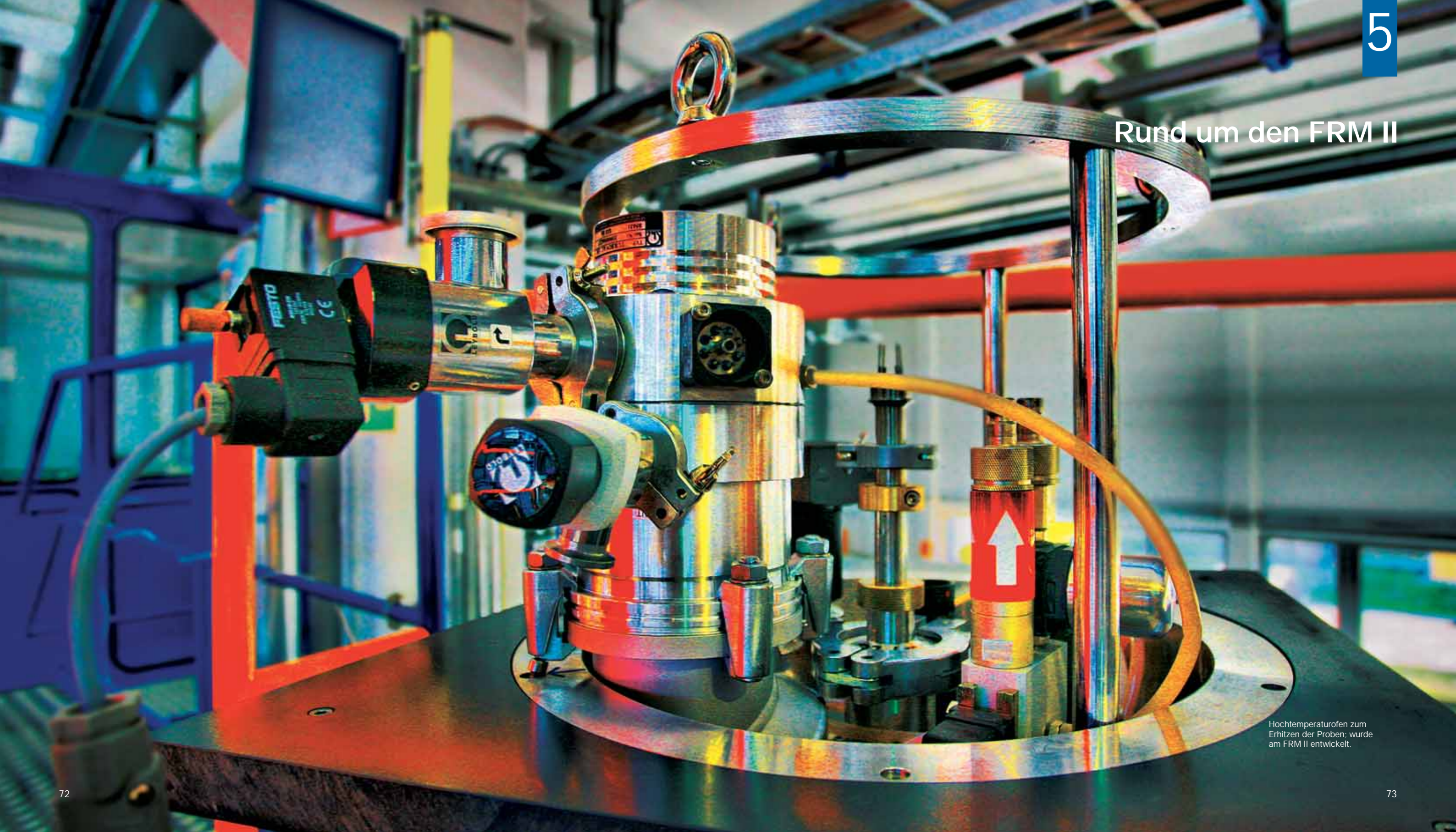
Ein weiteres Produkt der Firma itm ist itm Rhenium-PTA/PTCA®. In Zusammenarbeit mit dem Klinikum Augsburg wurde das Verfahren, das bei Gefäßverengungen eingesetzt wird, entwickelt. Im September 2008 wurde das CE-zugelassene Verfahren in Kliniken in Deutschland eingeführt. Bei der Behandlung, die im Anschluss an eine Aufdehnung des Gefäßes (PTA, PTCA) durchgeführt wird, gelangt der Betastrahler Rhenium-188 mithilfe eines Ballonkatheters an die betroffene Verschlussstelle des Blutgefäßes. Durch die gezielte Bestrahlung wird ein erneuter Verschluss der Arterie verhindert; das Blut kann wieder ungehindert fließen und das Gefäß bleibt langfristig offen. So lassen sich beispielsweise Beinamputationen in Folge von Diabetes verhindern.

Aufgrund des wissenschaftlichen Fortschritts und der verbesserten

Einsatzmöglichkeiten in Diagnostik und Therapie besteht weltweit ein wachsender Bedarf an neuen Radioisotopen und Radiopharmaka. Die Nachfrage nach bestimmten Radioisotopen ist außerordentlich hoch. Allerdings sind die Produktionskapazitäten der Forschungsreaktoren, in denen sie hergestellt werden, begrenzt. Das hat bereits zu Versorgungsengpässen und die Lebensqualität steigernden radioaktiven Präparaten geführt. Zudem werden einige ältere Forschungsreaktoren in absehbarer Zeit abgeschaltet. Aufgrund der niedrigen Halbwertszeit besteht prinzipiell keine Lagermöglichkeit: Diese Präparate müssen kontinuierlich produziert, rasch transportiert und zügig eingesetzt werden. Zur Sicherstellung der Versorgung mit Radioisotopen beabsichtigt der FRM II seine Produktionsmöglichkeiten deutlich zu erweitern.



Mit einer Spritze wird das Radioisotop für die Injektion in einem Ballonkatheter entnommen (itm Rhenium-PTA/PTCA).



Hochtemperaturofen zum Erhitzen der Proben; wurde am FRM II entwickelt.



Aktiv für den Umweltschutz

Um Beeinträchtigungen des Landschaftsbildes und des Naturhaushalts aufzuwiegen, ist vom Gesetzgeber die Schaffung von ökologischen Ausgleichsflächen im Rahmen jedes Bauprojekts vorgeschrieben. Ihre Größe errechnet sich aus Art und Umfang des Bauvorhabens. Statt der auf diese Weise errechneten vier Hektar Ausgleichsfläche für den Bau des FRM II wurde mehr als das Doppelte, nämlich insgesamt 8,4 ha von der Technischen Universität München zur Verfügung gestellt. Es handelt sich um ein Gebiet am Zusammenfluss von Garchinger Mühlbach und Gießen, etwa 1 km südlich vom Campus Garching entfernt. Dieses früher intensiv landwirtschaftlich genutzte Areal umfasst heute Magerrasenstellen, einen Altwasserarm und eine Waldrandzone mit Heckenstrukturen. Fauna und Flora sind vielfältig: 2001 wurden neben 118 Blumen- und Kräuterarten allein 38 Tagfalterarten beobachtet. Auch Biber haben sich hier angesiedelt.



Abgenagte Baumstümpfe zeugen davon, dass ein Biber in der Ausgleichsfläche heimisch geworden ist.

Ebenso aufgrund gesetzlicher Vorgaben müssen ökologische Langzeitbeobachtungen durchgeführt werden; so dürfen Abluft und Abwasser des FRM II keinen Einfluss auf die Pflanzen- und Tierwelt in unmittelbarer Nachbarschaft der Anlage haben. Nach einer Nullkartierung in den Jahren 2001/02 vor der Inbetriebnahme fand 2007 die erste Bestandsaufnahme statt. Die



Karte der Ausgleichsfläche südlich des Campus Garching.



Blick in den Bereich der Aufforstung.

Beobachtungen betreffen Vegetation und ausgewählte Tiergruppen: Vögel, Schnecken, Nachtfalter und Makrozoobenthos (alle wirbellosen, mit bloßem Auge erkennbaren Unterwassertiere in der obersten Kies- und Bodenschicht, z.B. Köcherfliegenlarven, Egel, Strudelwürmer). Die Referenzflächen – nicht zu verwechseln mit der Ausgleichsfläche – wurden in einem Abstand von maximal fünf Kilometern vom FRM II gewählt. Sie liegen alle im und am Auwald beidseitig der Isar.

Die Ergebnisse sprechen für sich: Was Vegetation und Vogelbestände betrifft, so zeigten sich im Laufe der Zeit keine wesentlichen Veränderungen. Bei den Nachtfaltern wuchs sogar die Artenviel-

falt, ebenso bei den Schnecken. So finden sich nun die in Bayern stark gefährdete Graue Schließmundschnecke (*Bulgarica cana*) und die gefährdete Schmale Windelschnecke (*Vertigo angustior*) in den Isarauen. Auch bei den Makrozoobenthos konnten mehr Arten gezählt werden. Dieses gibt Auskunft über die Gewässergüte und charakterisiert den untersuchten Flussabschnitt ökologisch als überregional bedeutsam. Neben fünf hochgradig bedrohten wurden zwölf gefährdete und zwei weitere Arten der Vorwarnliste beobachtet. Besonders bemerkenswert ist darüber hinaus das Vorkommen des vom Aussterben bedrohten Klauenkäfers (*Pomatinus subsatriatus*).



Vertigo angustior.



Wir über uns

Der FRM II ist eine „Zentrale Wissenschaftliche Einrichtung“ der Technischen Universität München. Das unterstreicht seine interdisziplinäre Ausrichtung und Nutzung.

Die rund 260 ständigen Mitarbeiter vor Ort können drei Bereichen zugeteilt werden: dem Reaktorbetrieb, der Wissenschaft und der Verwaltung. Etwa zwei Drittel der Beschäftigten sind direkt bei der TUM angestellt. Ein Drittel bringen andere Hochschulen, Helmholtz-

Forschungszentren und Max-Planck-Institute für die wissenschaftliche Nutzung am FRM II ein, wobei das Forschungszentrum Jülich eine eigene große Außenstation betreibt.

Die Bundesregierung beabsichtigt, ihr Engagement für die wissenschaftliche Nutzung des FRM II über die Helmholtz-Gemeinschaft noch wesentlich zu verstärken.

Als universitäre Einrichtung ist der FRM II auch Ausbildungsstätte:

Praktika, Diplomarbeiten und Vorlesungen aus dem FRM II sind in die Studiengänge der TUM eingebaut. Im Rahmen der jährlichen Neutronenschule des Forschungszentrums Jülich kommen internationale Studenten eine Woche lang an den FRM II, um an den Instrumenten eigene Erfahrungen zu sammeln. Über mehrere EU-Programme wird diese Ausbildung internationaler Studenten gefördert. Schätzungsweise die Hälfte der Forschung am FRM II geschieht im Rahmen von Doktor-



Großer Andrang am Tag der offenen Tür bei der Einschreibung zum Besuch an der Forschungs-Neutronenquelle.



arbeiten aus allen Disziplinen. Damit steht die Neutronenquelle in der Tradition ihres Namenspatrons Heinz Maier-Leibnitz und betont die Ausbildung durch Forschung. Ausbildung auf allen Ebenen bedeutet auch Berufsausbildung: Der FRM II bildet zurzeit sieben Lehrlinge in den Bereichen Fachinformatik und Mechatronik aus.

Attraktiv für Wissenschaftler

Pro Jahr kommen rund 1000 Gastwissenschaftler aus Deutschland, Europa und aus Übersee an den FRM II, um hier Experimente mit



Studenten bei ihrem Praktikum am FRM II in Theorie (oben) und Praxis (rechts).

Neutronenstrahlen durchzuführen. Sie haben zweimal jährlich die Möglichkeit, Anträge auf Strahlzeit zu stellen. Etwa 500 solcher Anträge werden jedes Jahr eingereicht. Die Nachfrage übersteigt hierbei die zur Verfügung stehende Messzeit um das Doppelte. Ein unabhängiger internationaler Gutachterausschuss beurteilt die Anträge nach wissenschaftlicher Attraktivität und spricht Empfehlungen für die Vergabe aus. Die

Messzeit variiert je nach geplantem Experiment: Während manche Messung nur Minuten dauert, benötigen andere mehrere Monate.

Besucherandrang täglich

Der FRM II steht nicht nur Wissenschaftlern offen. Für alle Interessierten gibt es zwei Möglichkeiten, sich ein unmittelbares Bild vom FRM II zu machen. Für Einzelpersonen bietet es sich an, einmal im Oktober jeden Jahres beim traditionellen „Tag der offenen Tür“ des Garching Campus an einer öffentlichen Führung teilzunehmen; Gruppen hingegen können sich ganzjährig beim Besucherdienst anmelden. Sie haben die Möglichkeit, im Rahmen einer

circa zweistündigen Führung einen Blick auf das Reaktorbecken zu werfen, durch die Experimentierhalle zu gehen und sich auf dem Besucherbalkon einen Überblick über die Neutronenleiterhalle zu verschaffen.

Gut 3000 Besucher machen von diesem Angebot jährlich Gebrauch. Aus organisatorischen Gründen ist bei der Anmeldung ein terminlicher Vorlauf von drei Monaten erbeten. Die Gruppengröße sollte möglichst 18 Personen nicht überschreiten, die Teilnehmer müssen mindestens 18 Jahre alt sein. Für Schulklassen gilt eine Altersgrenze von 16 Jahren. Alle Besucher benötigen einen gültigen Personalausweis oder Reisepass.





Kunstlicht

Eine wissenschaftliche Einrichtung wie die Forschungs-Neutronenquelle Heinz Maier-Leibnitz ist auf den ersten Blick ein Ort kühler Rationalität und ernstestrebens nach Erkenntnis. Aber natürlich arbeiten hier Menschen, die neben der wissenschaftlichen Ratio ein Gefühl für Ästhetik, Schönheit und Harmonie in sich tragen.

Diesem Spannungsfeld will der 1943 geborene Künstler Hermann Kleinknecht, der sich unter anderem durch verschiedene Skulpturen und Installationen im öffentlichen Raum einen Namen gemacht hat, mit seiner Lichtinstallation am FRM II nachspüren, es sichtbar und erfühlbar machen.

Die Lichtinstallation am FRM II besteht aus einem Zusammenspiel von drei Elementen. Rot leuchtende Kuben sind im regelmäßigen Abstand von drei Metern an dem das Gelände umgebenden Metallzaun angebracht. Mit dem weich wirkenden, aber in einer Signalfarbe gehaltenen Licht wird die Doppelfunktion des Zauns als Barriere und Schutz zugleich unterstrichen. 16 Edelstahlstelen mit blauen Leuchtröhren säumen

die Zugangsstraße zum FRM II. Zwar sind sie einander gleichmäßig rechts und links gegenübergestellt, ihre Abstände hingegen sind unterschiedlich, was die scheinbar stringente Hinführung zum Ziel stört und so aufbricht. Im Lichtaggregat schließlich, dem den Zentralbereich des FRM II beherrschenden kubischen Glaskörper, regiert das Zufallsprinzip. Elf Glaskanäle durchziehen ihn, von denen fünf blau und sechs türkis leuchten. Die einzelnen Kanäle überschneiden sich weder, noch berühren sie sich. Trotz der chaotischen Anordnung vermittelt der Kubus ein Gefühl der Ordnung, die für ein Grundprinzip der Natur ebenso stehen kann wie für die Arbeit des Wissenschaftlers. Seine Aufgabe ist es, im scheinbar Zufälligen die Gesetzmäßigkeit zu erkennen und für den Fortschritt nutzbar zu machen.

Kleinknecht gelingt es mit seiner Installation, durch die von außen nach innen zunehmende Störung der Anordnung den Betrachter gleichsam zu irritieren und so seine Sinne zu schärfen für die Schönheit, die gerade nicht der absoluten Regelmäßigkeit bedarf.



Lichtinstallation von Hermann Kleinknecht.

Ein Blick in die Zukunft



J-CNS KWS-1
Jülich Centre for Neutron Science

Die Kleinwinkelstreuapparatur des Jülich Centre for Neutron Science in der Neutronenleiterhalle West des FRM II.



Ein Blick in die Zukunft

Forschung lebt von kreativen Ideen und neuen Fragestellungen. Stillstand bedeutet Rückschritt. Deshalb baut die Forschungs-Neutronenquelle Heinz Maier-Leibnitz ihre Möglichkeiten kontinuierlich weiter aus. In den nächsten Jahren wird die Nutzung durch zusätzliche Messmöglichkeiten in neuen Experimentierhallen mit mehr Mitarbeitern erweitert werden. Die Anzahl von heute 20 im Messbetrieb befindlichen Instrumenten wird bis 2012 auf 30 ansteigen. Darüber hinaus wird die Neutronenstreuung ständig weiterentwickelt, indem bestehende Instrumente verbessert und neue Methoden erprobt werden.

Urknall

Ein großes Projekt in den nächsten Jahren ist der Bau der ultrakalten Neutronenquelle, die neben der bestehenden heißen und kalten Quelle völlig neue Experimente ermöglichen wird: Im Rahmen des Exzellenzclusters „Entstehung und Aufbau des Universums“ werden Messungen zu Lebensdauer und elektrischem Dipolmoment des Neutrons durchgeführt. Die Wissenschaftler der TUM, LMU und mehrerer Max-Planck-Institute zielen damit darauf, den Ursprung des Universums zu verstehen.

Radiopharmaka

Eine weitere Herausforderung, der sich der FRM II stellen will, ist der weltweit steigende Bedarf an Radiopharmaka. Zum einen sollen die bestehenden Bestrahlungseinrichtungen durch die im industriellen Anwenderzentrum ansässigen Firmen intensiver ausgenutzt werden, zum anderen ist eine neue Anlage zur Produktion großer Mengen des Isotops Molybdän-99 in Planung. Dieses wird routinemäßig zur Diagnose und Behandlung von Tumorerkrankungen eingesetzt.

Neue Südhalle

In Forschung und Industrie steigt ständig die Nachfrage nach Experimenten mit Neutronenstrahlen, weshalb zusätzliche Instrumente gebaut werden. Zusätzlich zur Osthalle, die baldmöglichst als neue Neutronenleiterhalle für etwa fünf Instrumente genutzt werden wird, besteht die Möglichkeit, Neutronen in eine weitere noch zu bauende Halle südlich des FRM II zu leiten. Sobald das Atom-Ei von seinem jetzigen Inventar geräumt ist, steht es zur Erweiterung der Neutronenleiterhalle West zur Verfügung.

Wissenschaftliche Kooperation

Eine stark erweiterte Nutzung erfordert zusätzliche Mitarbeiter: Statt der derzeit rund 260 werden zukünftig bis zu 400 Personen vor Ort tätig sein. Für mehr Personal sind auch weitere Büro- und Laborräume erforderlich, die zügig errichtet werden oder durch Erweiterung bereits bestehender Gebäude entstehen sollen. Solche Aufgaben kann der FRM II nicht allein bewältigen. Die vielen Neuerungen sind nur mit dem Rückhalt der Technischen Universität München, des Freistaats Bayern und des Bundes möglich. Der FRM II strebt deshalb eine Kooperation mit der Helmholtz-Gemeinschaft an. Zusätzlich wird die Zusammenarbeit mit Max-Planck-Instituten und anderen Universitäten intensiviert. Die Nutzung des FRM II, der deutschen Neutronenquelle mit internationaler Ausstrahlung, wird von allen engagierten Wissenschaftler-Gruppen Deutschlands getragen werden.

Synergien: Spallations- und Reaktorquellen

Durch den Neubau der Anlage in Kombination mit der innovativen Instrumentierung nimmt der FRM II eine Spitzenstellung im internationalen Vergleich mit anderen Zentren ein. Mit dem Projekt

der Europäischen Spallationsquelle ESS wird zukünftig in Europa dem FRM II eine starke Konkurrenz erwachsen. Spallationsquellen haben einen zeitlich gepulsten Neutronenfluss. Im Maximum der Pulse wird der Fluss einer ESS den des FRM II deutlich übertreffen. Mit Experimenten, die diese kurzen Impulse ausnutzen, erschließt die ESS neue Anwendungsbereiche der Neutronenforschung. Im zeitlichen Mittel über alle Pulse bleibt jedoch der Neutronenfluss des FRM II überlegen. Deshalb wird der FRM II wissenschaftlich auch zukünftig seinen Spitzenplatz behaupten können. Dies gilt sowohl für Anwendungsfelder in der Neutronenstreuung, bei der ein kontinuierlicher Neutronenfluss vorteilhaft ist, als auch für die Bestrahlungseinrichtungen, die an der ESS prinzipiell nicht realisierbar sind.

Neuen Brennstoff entwickeln

Die Technische Universität München hat sich mit der Inbetriebnahme des FRM II verpflichtet, Uranbrennstoffe zu entwickeln, die eine geringere Anreicherung von ²³⁵Uran aufweisen. Hierfür muss die Dichte des Brennstoffs erhöht werden, ohne die technische und wissenschaftliche Qualität des FRM II zu beeinträchtigen. Für diese Entwicklung arbeitet die TUM mit führenden Laboratorien

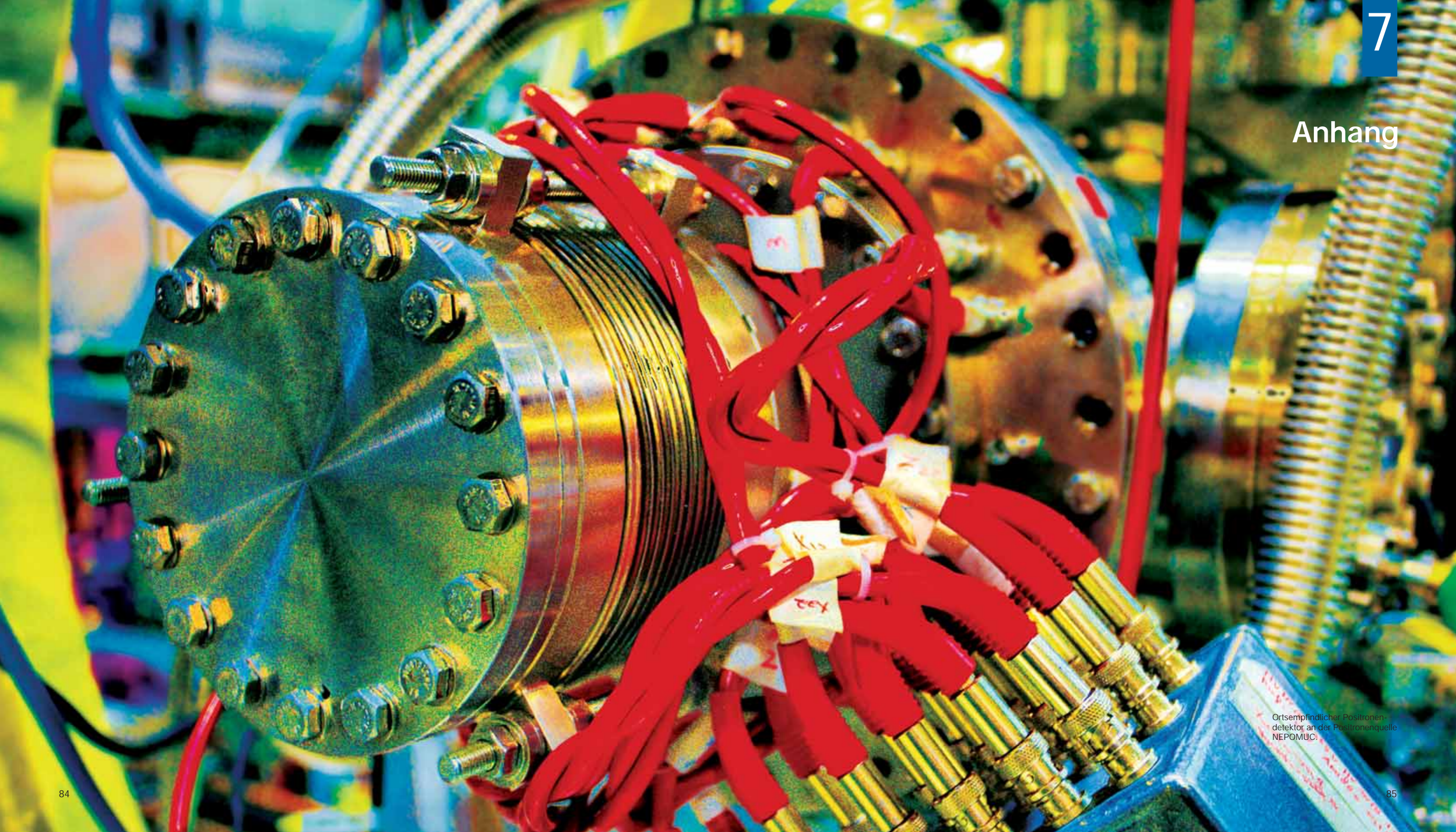
aus den USA und Frankreich zusammen. Große, aber nicht unüberwindbare metallurgische Probleme haben zu einer Revision der ursprünglichen Zeitpläne für diese Umrüstung geführt. Nach heutigem Stand der Wissenschaft ist eine solche Umrüstung erst in der zweiten Hälfte des nächsten Jahrzehnts machbar.

Ausbildung in der Kerntechnik

Die Ausbildung von hochqualifizierten Mitarbeitern ist für eine Technische Universität die zentrale Aufgabe. Gerade im Bereich Kerntechnik ist in Deutschland Know-how weiterhin gefragt. Am FRM II, wie auch dem Lehrstuhl für Nukleartechnik der TUM, werden jährlich Dutzende Studenten in Kerntechnik unterrichtet. Einmalig für Deutschland ist, dass die Praktikanten, Diplomanden, Doktoranden und jungen Wissenschaftler in der praktischen Tätigkeit die Reaktorphysik und den Umgang mit ionisierender Strahlung lernen.

Der FRM II ist ein Garant für die Erhaltung und Erweiterung des Wissens in Bezug auf Kerntechnik, wie es für die Grundlagenforschung, die industrielle Anwendung und Strahlenmedizin unumgänglich ist.





Ortsempfindlicher Positronendetektor an der Positronenquelle NEPOMUC.



Glossar

Antineutrino

Elementares Teilchen, das beim Zerfall des Neutrons entsteht und mühelos Materie wie zum Beispiel die Erde durchdringt.

Atom

Kleinstes Teilchen chemischer Substanzen. Atome haben einen Kern, der aus Protonen und Neutronen besteht, sowie eine Hülle aus Elektronen.

CERN

Das CERN (Europäische Organisation für Kernforschung) ist eine Großforschungseinrichtung in der Nähe von Genf, Schweiz. Dort wird Grundlagenforschung im Bereich der Kern- und Teilchenphysik betrieben. Bekannt ist besonders der große Teilchenbeschleuniger, bei dem die Zusammensetzung der Materie erforscht wird.

Detektor

Nachweisgerät für Strahlung.

Diffusion

Durchmischung von Teilchen, wie Atome oder Moleküle, bei hohen Temperaturen.

Dipolmoment, elektrisches

Kraft, die auf ein Objekt mit räumlicher Trennung von positiver und negativer Ladung in einem äußeren elektrischen Feld wirkt.

DNS

Desoxyribonukleinsäure, Baustein des Erbguts im Zellkern.

Dosimeter

Nachweisgerät für radioaktive Strahlung.

Dosis

Maß für die biologische Strahlenwirkung.

Emulsion

Vermengung nicht mischbarer Flüssigkeiten, wie beispielsweise Öl und Wasser.

Evolventenform

Gebogene Anordnung von Linien, die jeweils einen gleichbleibenden Abstand haben.

Gamma-Strahlen

Hochenergetische elektromagnetische Strahlung, die bei Kernreaktionen (radioaktiver Zerfall oder Kernfusion in Sternen) entsteht.

(physikalische) Halbwertszeit

Zeitspanne, in der sich die Radioaktivität auf die Hälfte verringert.

Hydride

Metall-Wasserstoff Verbindung.



Ion

Elektrisch geladenes Atom.

Isotop

Mit dem chemischen Element ist die Anzahl der Protonen im Kern und die gleiche Anzahl von Elektronen in der Atomhülle festgelegt. Kerne eines chemischen Elements können eine unterschiedliche Anzahl von Neutronen enthalten. Diese verschiedenen schweren Atome nennt man Isotope des Elements.

Katalyse/Katalysator

Reaktion von Stoffen durch Beigabe von Hilfsstoffen (Katalysatoren), die bei der Reaktion jedoch unverändert bleiben.

Kelvin

Maßeinheit der Temperatur auf absoluter Skala, 273,15 Kelvin entsprechen 0 Grad Celsius.

Kernreaktion

Änderung des Kernaufbaus durch eine spontane Reaktion oder durch Beschuss des Kerns mit anderen Kernen oder Kernbausteinen.

Kettenreaktion

Vorgang, bei dem der auslösende Effekt selbst wieder erzeugt wird. So werden für die Kernspaltung im Reaktor Neutronen benötigt, die wiederum bei der Kernspaltung von Uran frei werden.

Kleinwinkelstreuung

Siehe Exkurs „Blick in die Nanowelt“ auf Seite 54.

Konvektion/Naturkonvektion

Durchmischung von Flüssigkeiten durch Dichteschwankungen unter Einwirkung der Schwerkraft.

Lipid

Überbegriff für Fett, Öl und Wachs.

Megawatt (Watt)

Eine Million Watt, 1 MW = 1.000.000 W, Maßeinheit für Leistung.

Membran

Schicht aus Molekülen, die beispielsweise die Wand einer Zelle bilden.

Mikrometer

Ein Millionstel Meter, ein Tausendstel Millimeter. Der Durchmesser eines Haares beträgt etwa 5 Mikrometer.

Millisievert

Einheit für Strahlendosis. Die mittlere Strahlendosis für eine Person in Deutschland beträgt vier Millisievert pro Jahr inklusive medizinischer Bestrahlung.

Molekül

Mehrere Atome bilden ein Molekül.



Nanometer

Ein Milliardstel Meter, ein Millionstel Millimeter, ein Tausendstel Mikrometer. Der Abstand zweier benachbarter Atome beispielsweise im Aluminium beträgt etwa 0,3 Nanometer.

Nanotechnologie

Anwendung von Materialien, deren innere Strukturen im Bereich von 2-100 Nanometern liegen. Beispiele hierfür sind Strukturen in modernen Computerprozessoren oder Hochleistungslegierungen.

pH-Wert

Maß für den Gehalt von Wasserstoffionen in einer Flüssigkeit. Hierbei entspricht ein pH-Wert von 7 reinem, neutralem Wasser, niedrigere Werte werden als sauer bezeichnet, höhere Werte als basisch.

Polymer

Chemische Materialien, die aus vielen gleichen Bausteinen (Monomeren) aufgebaut sind. Bekanntes Beispiel ist die Aneinanderreihung von Vinylchlorid zu PVC (Polyvinylchlorid).

Positron

Antiteilchen zum Elektron.

Quantenmechanik

Physikalisches Fachgebiet. Erweiterung der klassischen Mechanik auf kleinste Teilchen, die sich im Gegensatz zu großen Objekten

des täglichen Lebens auch wie eine Welle verhalten.

Radioaktivität

Spontaner Zerfall von Atomkernen unter Aussendung von Strahlung.

Radiopharmakon

Ein in der Nuklearmedizin genutztes Arzneimittel, das eine radioaktive Substanz enthält.

Redundanz

In der Technik bezeichnet man Redundanz als das zusätzliche Vorhandensein funktional gleicher oder vergleichbarer Komponenten, wenn diese im Normalbetrieb nicht benötigt werden.

Richterskala

Maß für die Stärke von Erdbeben.

Spallationsneutronenquelle

Im Gegensatz zur Kernspaltung werden bei der Spallation die Neutronenstrahlen durch den Beschuss von schweren Elementen mit schnellen Protonen freigesetzt.

Spektrometer

Analysiert man Strahlung nach ihrer Energie, so misst man beispielsweise das Wellenlängenspektrum des Lichts in einem Spektrometer. Dieser Begriff wird entsprechend für alle anderen Strahlenarten, so auch für die Neutronen verwendet.



In einem Dreiachsenspektrometer wird die Änderung der Neutronenwellenlänge bei der Wechselwirkung mit der zu untersuchenden Probe vermessen. Hierfür wird die Wellenlänge des Neutronenstrahls an der ersten Drehachse des Spektrometers ausgewählt, an der zweiten Achse in der Probe verändert und in der dritten Achse analysiert, bevor die Neutronen anschließend im Detektor nachgewiesen werden.

(weißes) Spektrum

Verteilung von Wellenlängen im Neutronenstrahl, wie er aus den Strahlrohren des FRM II herauskommt. Analog zum weißen Licht, das sich aus der Summe der einzelnen Farben zusammensetzt, besteht der Neutronenstrahl aus einem kontinuierlich verteilten Spektrum von Wellenlängen.

Tensid

Bestandteil von Waschmitteln.

Tscherenkow Licht

Tiefblaues Licht, abgestrahlt vom Wasser, welches das Brennelement umgibt. Es entsteht durch die Wechselwirkung von hochenergetischen Elektronen mit den Wassermolekülen. Die Elektronen müssen sich schneller bewegen als die Lichtgeschwindigkeit durch Wasser.

Untergrundstrahlung

Strahlintensität, die nicht vom eigentlichen Messsignal an der Probe entspringt. Zu einem guten Teil besteht sie aus Höhenstrahlung.

Uran/Uransilizid

Chemisches Element, das mit Silizium eine chemische Verbindung als Uransilizid (U_3Si_2) eingeht.



Partner: Universitäten und Institute



Bayerisches Geoinstitut
Universität Bayreuth
Universitätsstr. 30, 95447 Bayreuth
www.bgi.uni-bayreuth.de



Jülich Centre for Neutron Science JCNS
Forschungszentrum Jülich GmbH
52425 Jülich
Außenstation am FRM II: 85748 Garching
www.jcns.info



Technische Universität Clausthal
Institut für Werkstoffkunde und
Werkstofftechnik
Agricolastr. 6, 38678 Clausthal-Zellerfeld
www.iww.tu-clausthal.de



Universität der Bundeswehr München
Institut für Angewandte Physik
und Messtechnik
Werner-Heisenberg-Weg 39
85577 Neubiberg
www.unibw.de/lrt2/



Exzellenzcluster Origin and
Structure of the Universe
Boltzmannstr. 2, 85748 Garching
www.universe-cluster.de



Lehrstuhl für Experimentalphysik I, E18
James-Franck-Str. 1, 85748 Garching
www.e18.physik.tu-muenchen.de



Georg-August-Universität Göttingen
Institut für Physikalische Chemie
Tammannstraße 6, 37077 Göttingen
www.uni-pc.gwdg.de/eckold/



Ludwig-Maximilians-Universität München
Sektion Kristallographie
Theresienstr. 41, 80333 München
www.krist.geo.uni-muenchen.de



Technische Universität Darmstadt
Fachbereich Material- und
Geowissenschaften
Petersenstr. 23, 64287 Darmstadt
www.tu-darmstadt.de/fb/matgeo/



Universität zu Köln
Institut für Kernphysik
Zülpicher Str. 77, 50937 Köln
www.ikp.uni-koeln.de



Klinikum rechts der Isar
Klinik und Poliklinik für Strahlentherapie
und Radiologische Onkologie
Ismaninger Str. 22, 81675 München
www.radonc.med.tu-muenchen.de



Lehrstuhl für Experimentalphysik III, E21
James-Franck-Str. 1, 85748 Garching
www.e21.frm2.tum.de

Geowissenschaftliches Zentrum
Goldschmidtstr. 1-3, 37077 Göttingen
www.gzg.uni-goettingen.de

Sektion Physik
Schellingstr. 4, 80799 München
www.softmatter.physik.uni-muenchen.de



GKSS-Forschungszentrum
Geesthacht GmbH
Max-Planck-Str. 1, 21502 Geesthacht
www.gkss.de



Max-Planck-Institut für Festkörperphysik
Heisenbergstr. 1, 70569 Stuttgart
www.fkf.mpg.de



Technische Universität Dresden
Institut für Festkörperphysik
01062 Dresden
www.physik.tu-dresden.de/ifp

II. Physikalisches Institut
Zülpicher Str. 77, 50937 Köln
www.ph2.uni-koeln.de



Lehrstuhl für Experimentalphysik IV, E13
James-Franck-Str. 1, 85748 Garching
www.e13.physik.tu-muenchen.de



Lehrstuhl für Radiochemie
Walther-Meissner-Str. 3
85748 Garching
www.radiochemie.de



Helmholtz Zentrum Berlin für Materialien
und Energie GmbH (HZB)
Glienicke Straße 100, 14109 Berlin
www.helmholtz-berlin.de



RWTH Aachen
Institut für Kristallographie
Jägerstr. 17-19, 52066 Aachen
www.xtal.rwth-aachen.de



Universität Augsburg
Institut für Physik
Lehrstuhl für Chemische Physik
und Materialwissenschaften
86135 Augsburg
www.physik.uni-augsburg.de/cpm/

Institut für Anorganische Chemie
Landoltweg 1, 52074 Aachen
www.ac.rwth-aachen.de



Institute der Technischen Universität München

Die genannten Partner und Institute beteiligen sich an der Instrumentierung des FRM II.



Neufahrn bei Freising

Flughafen München

92

Hollern

E45

9

11

388

Unterschleißheim

Eching

Dietersheim

Lohhof

Garching Nord

Forschungsgelände
U6 Garching-Forschungszentrum

Technische Universität

Oberschleißheim

Garchinger See

Hochbrück

Garching b. München

388

Schörgenbach

471

Lustheim

Garching-Süd

Dirn- ismaning

471

M.-Neuherberg

AB-Kr. M.-Nord

Ismaning

Speichersee

Hasenberg

Neuherberg

Fröttmaning-Nord

Allianz-Arena

Freimann

99

E45

E52

Aschheim/
Ismaning

Lerchenau

Fröttmaning-Süd

Unterföhring

Feringasee

Milbertshofen

M.-Frankfurter Ring

Hausen

Kirchheim b. München

Olympia-turm
Olympia-park

MÜNCHEN

Johanneskirchen

Aschheim

Heimstetten

Schwabing

Englischer Garten

471