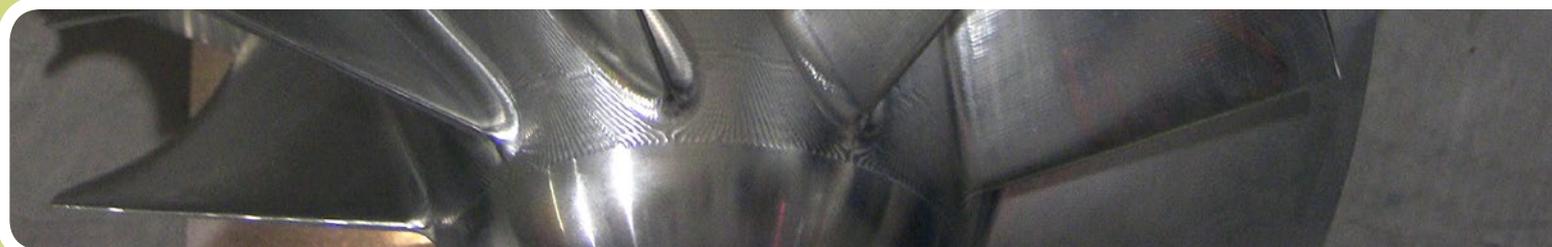
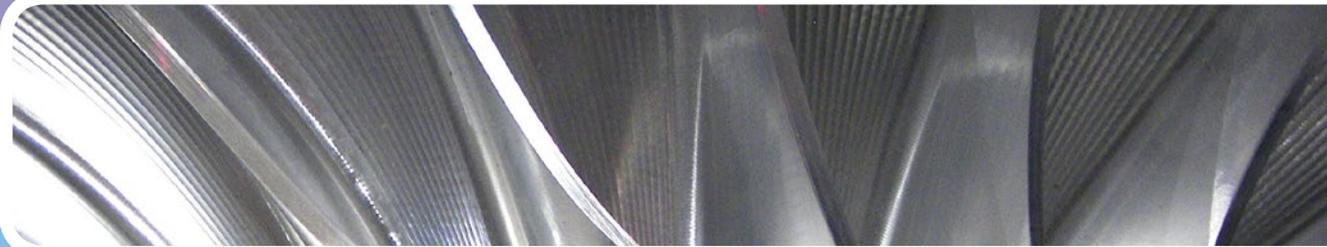




# Neutronen für Industrie und Medizin





# Neutronen für Industrie und Medizin

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung

Bayerisches Staatsministerium für  
Bildung und Kultus, Wissenschaft und Kunst





**Peter Driessen**  
Hauptgeschäftsführer  
der IHK für München und  
Oberbayern

### Forschung als Erfolgsfaktor für die Wirtschaft

Der Freistaat Bayern ist einer der führenden Industrie- und Wissenschaftsstandorte in Europa. Unternehmen mit Weltruf haben hier ihren Sitz, gleichzeitig sind zahlreiche namhafte Wissenschaftseinrichtungen aus den unterschiedlichsten Disziplinen hier beheimatet. Die gelungene Verbindung von Wirtschaft und Wissenschaft ist einer der wesentlichen Erfolgsfaktoren, wenn es um Forschung und Entwicklung geht. München und Oberbayern sind in dieser Hinsicht hervorragend aufgestellt.

Bayern und Garching sind seit jeher ein Standort für die Neutronenforschung gewesen. Im Jahr 1957 wurde hier auf Initiative von Prof. Heinz Maier-Leibnitz der erste Forschungsreaktor in Deutschland in Betrieb genommen. Er war die Keimzelle für den heutigen Campus der Universitätsstadt Garching, die das sogenannte „Atom-

Ei“ sogar in ihrem Stadtwappen verewigt hat. Mit der Forschungs-Neutronenquelle Heinz Maier-Leibnitz (FRM II) im Zentrum ist der Campus Garching einer der wichtigsten Forschungs- und Wissenschaftsstandorte in Deutschland.

Der FRM II der Technischen Universität München erbringt seit nunmehr 10 Jahren wissenschaftliche Spitzenleistungen – und das oftmals im Zusammenspiel mit der Wirtschaft. In ganz unterschiedlichen Branchen konnten Lösungen gefunden werden, deren praktische Anwendungen uns heute nützen. Fragen der Materialermüdung oder von Strukturen neuer Materialien blieben ohne die Nutzung von Neutronenstrahlen heute ohne Antwort.

Solch ein Erfolg kann nur gelingen, wenn Grundlagen vorhanden sind, auf denen die Arbeit der Wissenschaftler aufbauen kann. Zwei Punkte stelle ich in diesem Zusammenhang heraus:

Zum einen ist Forschung kostenintensiv – aber sie nützt der Allgemeinheit, da ihre Erkenntnisse die Wirtschaft stärken und der Gesellschaft dienen. Daher liegt es im Interesse aller, dass Forschung und Entwicklung in Deutschland gefördert wird. Die IHK für München und Oberbayern tritt dafür ein, dass diese Mittel zielgerichtet weiter ausgebaut werden, um den hiesigen Wirt-

schaftsstandort weiter zu stärken und den Wohlstand zu sichern. Investitionen in diesem Bereich sind Investitionen in die Zukunft.

Zum anderen sind neue Ideen, beste Forschungsergebnisse und hervorragend ausgebildete Nachwuchskräfte für einen Innovationsstandort wie Bayern von enormer Bedeutung. Die Technische Universität München ist daher eine der wissenschaftlichen Säulen für den Erfolg unseres Wirtschaftsraums. Die im Rahmen der Exzellenz-Initiative erzielten Ergebnisse unterstreichen die herausragende Stellung der TUM in der bundesdeutschen Hochschullandschaft. Diese Exzellenz gilt es zu wahren und auszubauen, denn sie wirkt nicht nur als Leuchtturm, sondern auch als Zugpferd für die ganze Region.

Die Leistungsfähigkeit des Innovationsstandortes Bayern ist kein Selbstläufer. Die bayerische Industrie investiert pro Jahr über 11 Milliarden Euro in Forschung und Entwicklung. Über 35 % der F&E-Investitionen entfallen dabei auf den Bereich der Spitzentechnologie – der Bundesdurchschnitt liegt bei 26,3 %. Gleichzeitig stärkt Spitzentechnologie die Entwicklung hochwertiger Technik. Industrieforschung profitiert von Kooperationen mit öffentlicher Forschung und umgekehrt. Für die Standortentwicklung sind die laufenden Universitäts-, Unternehmens- und Clusteraktivitäten von großer Bedeu-

tung. Netzwerke, die entlang gewachsener Wirtschaftsstrukturen agieren, bringen hier wertvolle Impulse für den Wirtschaftsraum.

Die Forschungs-Neutronenquelle Heinz Maier-Leibnitz (FRM II) betreibt einerseits Grundlagenforschung, andererseits industrielle und medizinische Anwendungsforschung. Das unterstreicht die Bedeutung der Einrichtung, die national wie international einen hervorragenden Ruf genießt.

Als Hauptgeschäftsführer der IHK für München und Oberbayern hoffe ich sehr, dass wir alle als Gesellschaft weiterhin von den Erkenntnissen Ihrer Arbeit profitieren können und möglichst viele Unternehmen auch künftig die Zusammenarbeit mit Ihnen suchen.





Grußwort von Peter Driessen	4
„Industrie und Wissenschaft sind längst ein Erkenntnisverbund“	
Interview mit Prof. Richter und Prof. Petry	8
Neutronen bringen Licht ins Dunkel	14

## Energie

Batterien beim Beladen zusehen	24
Hochtemperatur-Werkstoffe für Gasturbinen	26
Exakte Dotierung mit Neutronen	28
Batterien für Hybridlokomotiven	30
Wasserstoffspeicherung – eine Frage der cleveren Kombination von Methoden	32

## Technologieentwicklung

Dem Wasser in der Isolierung von Flugzeugen auf der Spur	36
Neuartiger Farblöser reinigt Pinsel ohne Lösungsmittel	38
Eigenspannungen in Bauteilen	40
Betonhärtung: Was macht das Wasser im Zement?	42
Strahlungsresistenz von Bauteilen für die Ionentherapie	44
Spannungen in Stahl gegossen	46

## Qualitätssicherung

Boräquivalent als Maßgröße für Verunreinigungen	50
Qualitätssicherung bei der Produktion von Autotüren	52
Neutronenstrahlen zur Gesteinsanalyse und Produktion von Strahlenquellen	54
Auf Reinheit geprüft	56
Mit Neutronen dicke Bretter bohren	58

## Medizin

Neutronen zeigen Anreicherung von Antidepressivum im Gehirn	62
Krebszellen effizient bestrahlen	64
Neue Strategien für die künstliche Beatmung	66
Tumorbehandlung mit schnellen Neutronen	68

Impressum	70
-----------	----

## „Industrie und Wissenschaft sind längst ein Erkenntnisverbund“

Die beiden wissenschaftlichen Direktoren des Heinz Maier-Leibnitz Zentrums (MLZ), Prof. Dr. Dieter Richter und Prof. Dr. Winfried Petry, im Gespräch über das Potenzial der Neutronen für Industriekunden.

*Was sind die Vorteile von Neutronen gegenüber anderen Untersuchungsmethoden?*

**Petry:** Neutronen durchdringen mühelos jede Art von Materie, sagen uns wo die Atome sind, wie sie sich bewegen und vermessen deren magnetische Eigenschaften. Neutronen erforschen die mikroskopischen Ursachen für das makroskopische Funktionieren von Materialien.

*Industrie und Wissenschaft – passt das überhaupt zusammen? Kann ein Grundlagenforscher beurteilen, was die Wirtschaft benötigt?*

**Richter:** Das Problem ist manchmal: Wir Wissenschaftler in unserem Häuschen wissen nicht, was die Industrie braucht. Und die Industrie weiß wiederum nicht, was wir erforschen können. Die Wissenschaftler sind aber auch motivierter, wenn ihre Forschung eine Anwendung hat. Das stimuliert und es ist mir ein Anliegen, dass wir aus der Wissenschaft auch etwas tun für die Gesellschaft und nicht nur reine Neugier-Forschung betreiben.

**Petry:** Der Grundlagenforscher spielt mit neuen Ideen – zunächst zweckfrei, aber er hat bei diesen Ideen ständig potentielle Anwendungen im Kopf. Unsere Wissenschaftler haben Freude daran, Erkenntnisse aus dem Nanoskopischen auf neue Funktionalität abzuklopfen. Sie sind die idealen Partner der Industrie, die auf Innovation durch Grundlagenforschung angewiesen ist. Die Grundlagenforschung und die angewandte Forschung haben sich längst zu einem Erkenntnisverbund zusammengeschlossen.



Prof. Petry: „Grundlagenforschung und Industrie haben sich längst zu einem Erkenntnisverbund zusammengeschlossen.“



Prof. Richter: „Jülich hat eine lange Tradition in der Industriezusammenarbeit.“

*Was kann die Grundlagenforschung von der Industrie lernen?*

**Petry:** Nicht nur die Grundlagenforschung inspiriert neue Produkte in der Industrie, sondern die Industrie mit ihren Anforderungen an Materialien setzt längst die Themen der Grundlagenforschung. So ist der Wunsch, die Informationen immer dichter zu packen, ein Thema aus der Informationstechnologie.

*Warum sollte ich als Industriekunde ausgerechnet an das Heinz Maier-Leibnitz Zentrum kommen?*

**Petry:** Das MLZ hier auf dem Forschungscampus der Technischen Universität München mit seiner Breite an Ingenieur-, Lebens- und Naturwissenschaften stellt eine einmalige Bündelung von Kompetenz für die Industrie dar.

**Richter:** Wir bieten viel mehr wissenschaftliche Unterstützung als andere Facilities und sind außerdem stark im Bereich der weichen Materie, was für die chemische Industrie von Interesse ist. Das MLZ bietet viel mehr als Neutronen, denn neben der Universität sind wir in weitere Großforschungszentren eingebettet.

*Mit welchen Kompetenzen ergänzen die Partner des MLZ das Angebot des FRM II, Herr Richter?*

**Richter:** Geesthacht bringt viel Erfahrung in den Materialwissenschaften ein. Jülich hat eine lange Tradition mit viel Kompetenz in den Polymerwissenschaften, im Nanomagnetismus und auch in der Industriezusammenarbeit.



Prof. Petry: „Das wissenschaftliche Potenzial der Neutronen ist so gewaltig, dass wir gar nicht genügend Neutronenquellen haben können.“

*Auftragsarbeit oder Publikation: Welchen Nutzen hat der Industriekunde davon, seine Forschungsergebnisse zu veröffentlichen?*

**Petry:** Viele Fragestellungen, mit denen die Industrie zu uns kommt, sind genereller Natur, z.B. besser texturierte Blechteile für die Verformung zu Autoteilen. Diese Art der Entwicklung ist so grundlegend, dass sie gerechtfertigterweise im öffentlichen Raum stattfindet und für jeden zugänglich veröffentlicht wird. Zielt die Fragestellung jedoch auf ein einzelnes Produkt ab, wünscht der Kunde natürlich Eigentümer der Daten zu sein und muss dafür zahlen.

**Richter:** Eine echte Innovation kommt durch reine Auftragsarbeit nicht zustande, das entsteht nur durch Zusammenarbeit. Wir haben mit Neutronen in Jülich in Zusammenarbeit mit Exxon einen Zusatz gefunden, der heute weltweit in fast jedem Dieselmotortreibstoff eingesetzt wird. Er verhindert das Einfrieren des Diesels. Das dauerte damals nur vier Jahre von der Erfindung bis zum fertigen Produkt. Zu solchen Erfolgen kommt es nur durch das Zusammenspiel zwischen wissenschaftlicher Neugier und industriellen Anforderungen. Da muss man in einem echten Team zwischen Wissenschaftlern und Anwendern zusammen arbeiten. Das Ziel der Wissenschaftler war ursprünglich ein ganz anderes, erst die Anwender haben das Potential dieser Entwicklung für ein solches Produkt erkannt.

### *Gibt es Produkte, die der FRM II direkt herstellt?*

**Petry:** Obwohl die Forschungs-Neutronenquelle primär den Zweck hat, der Grundlagenforschung zu dienen, gibt es wichtige Bereiche, in denen sie direkt produziert. Mittels Neutroneneinfang wird am FRM II hochreines Silizium zu Halbleitern dotiert. Diese Dotierung ist weltweit die homogenste und das so dotierte Halbleitermaterial wird zu Bauteilen bei Hochspannungsgleichstromübertragung und Leistungsschaltung etwa in Hybridautos benötigt. Weitere direkte Produkte sind Radioisotope für die Nuklearmedizin und für die Industrie, etwa für Bestrahlungsquellen oder Tracer-Experimente.

### *Was bieten Neutronen dem Mediziner?*

**Petry:** Neutronen helfen dem Mediziner in drei Punkten:

Bei der Entwicklung von Materialien, die in der Medizin benötigt werden, von Implantaten bis zum OP-Werkzeug. Hier dienen Neutronen wie in der Materialwissenschaft zur Optimierung und Charakterisierung von Werkstoffen.

Die molekulare Bildgebung benötigt Radioisotope. Die meisten davon werden mit Neutronen erzeugt. Hier haben wir auf dem Gelände des FRM II eine eigene Infrastruktur in Form von Laborräumen geschaffen, die von Firmen der Radiopharmazie gemietet werden.

Neutronen haben eine Masse. Deshalb sind sie hervorragend dazu geeignet Tumorgewebe direkt abzutöten. Wir heilen also direkt Tumorerkrankungen. Dies bleibt jedoch auf oberflächennahe Tumore und eine kleine Anzahl von Patienten beschränkt.



Prof. Richter: "Wir dürfen nicht nur reine Neugier-Forschung betreiben."



Prof. Petry: „Neutronen werden uns helfen, die Lösungen für viele gesellschaftliche und technische Herausforderungen zu finden.“

*Wird die neue europäische Spallationsneutronenquelle in Lund (Schweden) eine Konkurrenz für den FRM II?*

**Richter:** Es ist längst Konsens, dass es nationale Quellen wie den FRM II und auf jedem Kontinent eine Megaquelle geben muss, wie die ESS in Lund es sein wird. Ohne die nationalen Quellen macht aber die ESS wenig Sinn. Die Wissenschaftler müssen an den nationalen Quellen auf breiter Basis forschen und dann an der Megaquelle die Spitzenergebnisse produzieren.

**Petry:** Das wissenschaftliche Potenzial der Neutronen ist so gewaltig, dass wir gar nicht genügend Neutronenquellen haben können. Auch die Wissenschaft wächst mit ihrer Konkurrenz, denn Konkurrenz schafft Exzellenz.

*Was werden bei Neutronenmessungen zukünftig die großen Themen sein?*

**Petry:** Neutronen werden uns helfen, die Lösungen für viele gesellschaftliche und technische Herausforderungen zu finden:

Energiespeicherung, -transport und -umwandlung sind Materialprobleme.

Mobilität mit weniger CO<sub>2</sub>-Ausstoss, weniger Energieverbrauch: Auch das ist eine Fragestellung der Materialforschung, wie etwa der Batterieforschung.

Informationsverarbeitung ist ein zentrales Thema unserer Gesellschaft: Wir träumen davon, die Information in einzelnen magnetischen Momenten eines Atoms oder Elektrons zu speichern. Neutronen spielen eine entscheidende Rolle bei der Charakterisierung solcher Eigenschaften.

**Richter:** Ich sehe eine starke Entwicklung bei den Lebenswissenschaften: Die pharmazeutische Forschung mit Neutronen etwa. Erst seit kurzem weiß man, dass die Bewegung von Molekülen eine wichtige Rolle bei ihrer Funktion spielt. Bisher ist die Bewegung von Molekülen bei der pharmazeutischen Wirkung noch gar nicht berücksichtigt worden. Neutronen bieten sich geradezu an, diese Dynamik zu untersuchen. Auch die Aggregation von Molekülen bei neurodegenerativen Erkrankungen wie Alzheimer kann mit Neutronen sehr gut dargestellt werden.

Und schließlich die molekularen Ursachen von Krankheiten: Hier sind Neutronen gefragt, um die Proteinänderungen zu verstehen.

*Muss ein Industriekunde die Neutronenmessung selbst durchführen?*

**Petry:** Nein, er bekommt von uns alles aus einer Hand: von der Beratung über die Durchführung der Messung bis hin zur Auswertung.



Prof. Richter: „Das MLZ bietet viel mehr als Neutronen.“

## Neutronen bringen Licht ins Dunkel

Die Forschungs-Neutronenquelle Heinz Maier-Leibnitz (FRM II) ist eine Großforschungsanlage für die Wissenschaft – aber nicht nur! Der FRM II kombiniert als Hochleistungsneutronenquelle Grundlagenforschung mit industrieller und medizinischer Nutzung; die Wissenschaftler haben im nunmehr zehnjährigen Betrieb erfolgreich eine Fülle von Anwendungen aus und mit Unternehmen bearbeitet. In dieser Broschüre finden sich eine Reihe von ganz unterschiedlichen Beispielen aus allen Branchen, von der Qualitätssicherung im Herstellungsprozess einer Autotür bis zur Entwicklung eines Farblösers.

### Was ist das Besondere an Neutronen?

Kurz gesagt: Sie sind sehr klein, magnetisch und elektrisch neutral! Ihre Geschwindigkeit und damit Energie kann exakt kontrolliert wer-

den. Neutronen durchdringen mühelos alle Arten von Materialien, mit ihrer Hilfe können Art, Lage, Magnetismus und Dynamik einzelner Atome bestimmt, Elemente verändert und genaue Bilder aus der Tiefe der Gegenstände erzeugt werden. Neutronen durchleuchten oder analysieren völlig zerstörungsfrei den Originalgegenstand, und das oftmals unter realen Einsatzbedingungen, der Messvorgang selbst beeinflusst das Resultat nicht.

Der FRM II stellt in Deutschland den höchsten Neutronenfluss zur Verfügung und liefert Neutronen unterschiedlicher Energie für etwa 30 verschiedene Strahlrohr-Instrumente. Eines davon ist die weltweit brillianteste Positronenquelle, die beispielsweise hervorragende Möglichkeiten der Oberflächen- und Defektanalyse bietet. Der FRM II kombiniert Grundlagenforschung mit



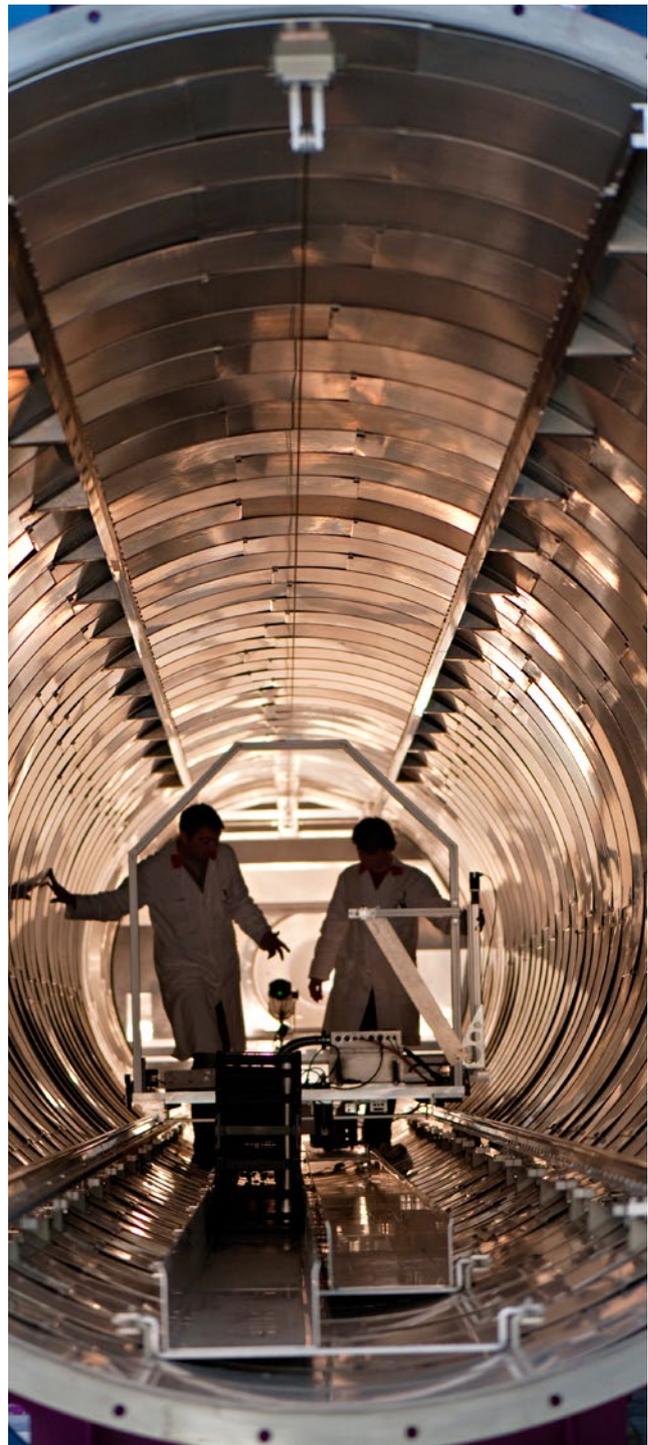
Die Forschungs-Neutronenquelle wird seit 2004 erfolgreich betrieben.

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

Die Wissenschaftler, die am FRM II Industriekunden bei der Lösung eines Problems betreuen, kennen sich nicht nur mit ihrem Gerät und der Methode gut aus, sie sind auch international anerkannte Fachkräfte auf den Gebieten der Materialforschung. Neben den Methoden der Neutronenstreuung setzen sie selbst für ihre eigene Forschung auch andere Methoden ein und können somit fundierte Hilfestellung für die Problemlösung bieten.

### Allgemeines

Die Forschungs-Neutronenquelle liefert in Zyklen von 60 Tagen an bis zu 240 Tagen pro Jahr Neutronen für die etwa 30 Instrumente. Neben den verschiedenen Messgeräten an Neutronen-Strahlrohren stehen außerdem Neutronen-Bestrahlungseinrichtungen zur Verfügung, beispielsweise für die Siliziumdotierung oder die



Insgesamt gibt es rund 30 wissenschaftliche Messinstrumente, wie hier das Kleinwinkelstreuungsinstrument SANS-1.

Produktion von Radionukliden, aber auch für andere Anwendungen. Teil des breiten Spektrums an unterschiedlichen Bestrahlungs-, Analyse- und Bildgebungsinstrumenten sind eine Reihe innovativer und einzigartiger Probenvorbereitungsmethoden.

Der FRM II ist für technische und industrielle Anwendungen offen. Ein grober Überblick über bisherige industrielle Anwendungen ergibt ein sehr breites Spektrum:

- Neutronen-Aktivierungsanalyse für fehlerfreie Multielementanalysen, Produktionsüberwachungen, Verbesserung von Herstellungsverfahren.
- Bestrahlung von Proben und Bauteilen für Präparateherstellung in Technik und Medizin, Tracer-Experimente, Verschleißmessungen, Bestrahlungsresistenz, homogene Dotierung von Silizium für die Halbleiterindustrie.
- Materialuntersuchungen mit den Entwicklungszielen  
höherer Verschleißfestigkeit (Speziallegierungen),  
hoher Temperaturbeständigkeit (Turbinenschaufeln),  
höherer Belastbarkeit (Automotive),  
leichterer Bauweisen (Verbundmaterialien),  
optimierter magnetischer Eigenschaften (Speichermaterialien),  
Erschließung neuer Materialressourcen (z. B. Keramik),  
Entwicklung neuer Herstellungsverfahren.

## Wie läuft ein Industrieprojekt ab?

Hierzu eröffnen sich der Industrie zwei Wege der Zusammenarbeit mit der Neutronenquelle: Wünscht der industrielle Auftraggeber alleiniger Eigentümer des Untersuchungsergebnisses zu sein, wird das Projekt als reine Auftragsarbeit mit voller Kostenübernahme des Auftraggebers durchgeführt. Der Auftraggeber hat hierfür zeitlich privilegierten Zugang, Messung und Auswertung werden durch die Experten des MLZ durchgeführt. Auf Wunsch werden auch komplementäre Methoden eingesetzt. Der Kunde bekommt ein Komplettpaket und ist streng geschützter Eigentümer der Resultate.

Weit öfter sind die Fragestellungen der industriellen Forschung von grundlegender Natur, so dass sie den Schulterschluss mit der Forschung im öffentlichen Raum sucht. So entstehen gemeinsame Entwicklungsprojekte zwischen Neutronenquelle und industriellem Partner. Alle Ergebnisse einer solchen wissenschaftlichen Kooperation müssen über Publikationen der Allgemeinheit zugänglich sein. Der Zugang zur Messzeit erschließt sich über ein unabhängiges Gutachtergremium, welches zweimal jährlich die aus wissenschaftlicher Sicht attraktivsten Messvorschläge aussucht. Dieser Zugang ist kostenfrei. Oft ist solche industrielle Forschung in größere thematische und öffentlich geförderte Kooperationen mit der Industrie eingebettet.

Der FRM II ist Mitglied im Fachausschuss „Angewandte zerstörungsfreie Werkstoff- und Bauteilprüfung“ des Vereins Deutscher Ingenieure (VDI), der als Plattform für Anwender aus der Industrie dient, die nach zerstörungsfreien Prüfungen für produktspezifische Fragestellungen suchen. Der Fachausschuss aus Mitgliedern des FRM II, der Industrie und assoziierten Instituten tagt regelmäßig, um aktuelle Messungen vorzubereiten.

ten und durchgeführte Experimente zu diskutieren. Der FRM II ist außerdem Organisator eines VDI-Expertenforums, das im Rhythmus von zwei Jahren auf dem Campus Garching stattfindet und bei dem aktuelle Themen der zerstörungsfreien Prüfung diskutiert werden.

#### Ansprechpartner für Industrieprojekte:

Dr. habil. Ralph Gilles  
Forschungs-Neutronenquelle  
Heinz Maier-Leibnitz (FRM II)  
Technische Universität München  
Lichtenbergstr. 1  
85748 Garching

Telefon: +49.(0)89.289.14665  
E-Mail: industrie@frm2.tum.de

#### Für die Bestrahlungsanlagen:

Dr. Heiko Gerstenberg  
Forschungs-Neutronenquelle  
Heinz Maier-Leibnitz (FRM II)  
Technische Universität München  
Lichtenbergstr. 1  
85748 Garching

Telefon: +49.(0)89.289.12145  
E-Mail: heiko.gerstenberg@frm2.tum.de



Die Neutronenleiterhalle West.



Radiographie eines Motors.

## Methoden und ihre Anwendung

Die Prompte Gamma (Neutronen) Aktivierungsanalyse (PGAA oder PGNA) ist eine radioanalytische Methode zur quantitativen Element- oder Isotopenanalyse, bei der charakteristische prompte Gammastrahlung als Folge von Neutroneneinfangsreaktionen gemessen wird. Der Neutroneneinfang ist eine grundlegende Kernreaktion, an der bis auf 4-Helium jedes Isotop teilnimmt. Die PGAA hat gegenüber anderen Analysemethoden einige Vorteile: Sie arbeitet zerstörungsfrei und analysiert sämtliche Isotope gleichzeitig, sie ermöglicht unmittelbare Messungen, unabhängig vom Aggregatzustand, sie erfordert keine aufwändige Vorbereitung und umfasst das ganze Volumen der Probe.

Grundsätzlich können dafür verschiedene Neutronenquellen benutzt werden: Kernreaktoren, radioisotopische Neutronenquellen oder Neutronengeneratoren. Die genauesten Ergebnisse liefert eine Quelle mit hohem Neutronenfluss wie ihn der FRM II zur Verfügung stellen kann.

## Radiographie und Tomographie mit Neutronen

Beide Verfahren funktionieren auch mit Röntgen- oder Gammastrahlen. Der Unterschied der graphischen Verfahren mit Neutronen besteht darin, dass sie mit den Atomkernen wechselwirken, nicht nur mit den Elektronen. Die resultierenden Bilder sind im Vergleich zur herkömmlichen Radiographie und Tomographie mit Röntgen- oder Gammastrahlung sehr viel detail- und kontrastreicher. Im Allgemeinen können Neutronen wesentlich massivere Werkstücke als Röntgen- oder Gammastrahlen durchdringen. Das kommt besonders in den Fällen zum Tragen, in denen große oder dichte Objekte untersucht werden. Beide Verfahren zerstören den untersuchten Gegenstand in keiner Weise; zusätzlich ist es auch

möglich, zeitaufgelöste Messungen durchzuführen. Bauteile können im Betrieb durchleuchtet werden, beispielsweise, um die gleichmäßige Ölschmierung in einem laufenden Motor zu untersuchen.

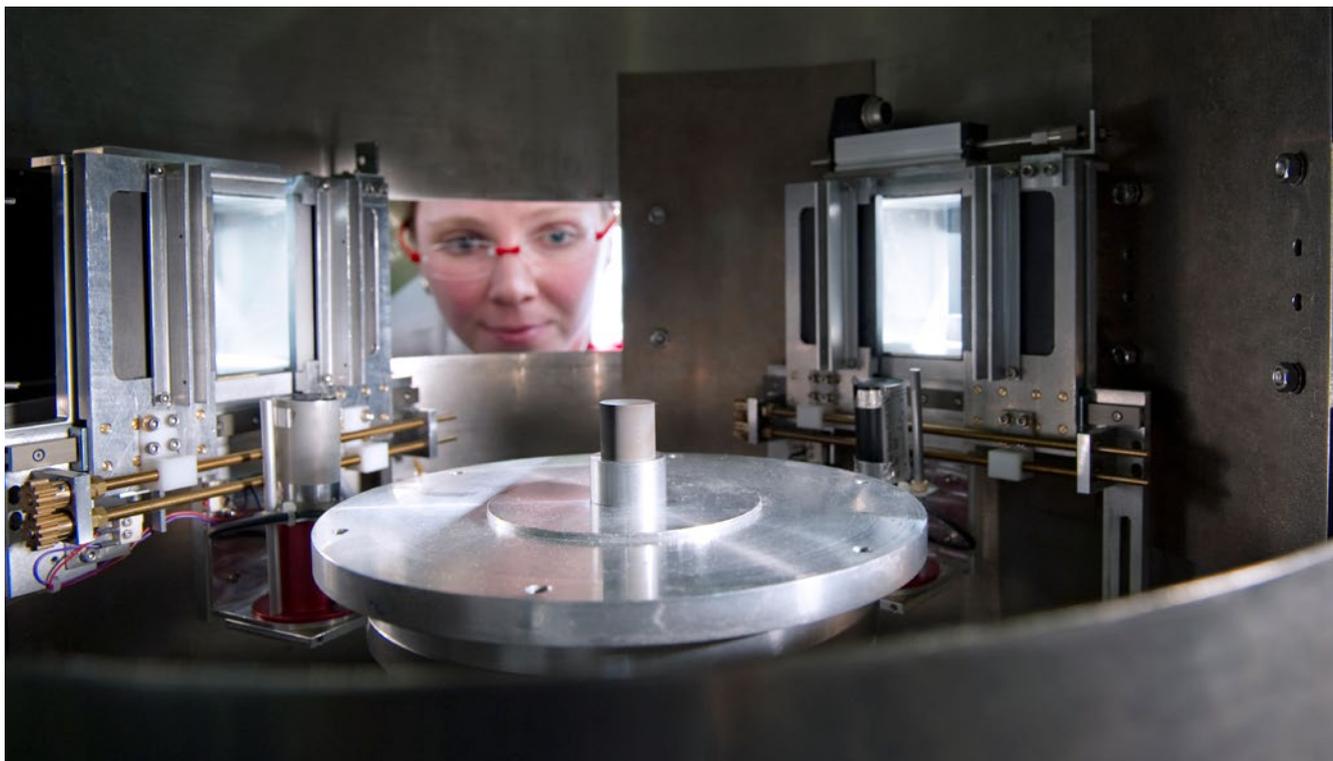
Der Kunde erhält die gemessenen Transmissionsbilder bzw. Tomographien als TIFF-Dateien, die mit einer herkömmlichen Bildbearbeitungssoftware weiter bearbeitet werden können.

### Kleinwinkelstreuung

Neutronen-Kleinwinkelstreuung ist eine weitere zerstörungsfreie Untersuchungsmethode, die geeignet ist für die Untersuchung von Mikrostrukturen zwischen 0,5 nm und 1000 nm. Biomoleküle und andere Polymere, aber auch Filtermaterialien, Legierungen oder Katalysatoren sind

häufig keine homogene Masse, sondern weisen über das gesamte Volumen Unterschiede in der Dichte, Konzentration oder auch Magnetisierung auf. Diese Unterschiede können durch die Kleinwinkelstreuung sichtbar gemacht werden, weil sie den anfangs parallelen Neutronenstrahl in charakteristischer Weise ablenken. Das Ergebnis ist eine Aussage über die mittlere Teilchengröße und deren Verteilung, aber auch über Form und chemische Struktur von Nanomaterialien. Selbst schnelle kinetische Prozesse sind damit zu beobachten.

Am FRM II stehen für ganz verschiedene Anwendungszwecke mehrere solcher Instrumente zur Verfügung, die jeweils an ein breites Spektrum von Proben angepasst werden können.



Der FRM II bietet vielfältige Untersuchungsmöglichkeiten für ein breites Spektrum an Anwendungen.

## Flugzeitspektroskopie mit kalten Neutronen

Die Flugzeitspektroskopie ist eine Methode, um die Bewegungen der Atome auf einer Zeitskala zwischen Pikosekunden und Mikrosekunden sichtbar zu machen. Dazu müssen die Neutronen aus der Quelle auf die passende Energie von einigen hundert Metern pro Sekunde abgebremst werden. Das bedeutet eine Energie, die in etwa den Atombewegungen entspricht. Am FRM II ist dies durch die sogenannte Kalte Quelle möglich. Neutronen aus der Kalten Quelle können Bewegungen in Flüssigkeiten, aber auch in Feststoffen gleichzeitig räumlich und zeitlich aufgelöst darstellen. Typische Anwendungen sind die Untersuchung der Diffusion in Metallen, Legierungen und Flüssigkeiten (auch kolloidale und ungeordnete Systeme), aber auch die Funktion und biologische Aktivität von Proteinen und ganzen Zellen.

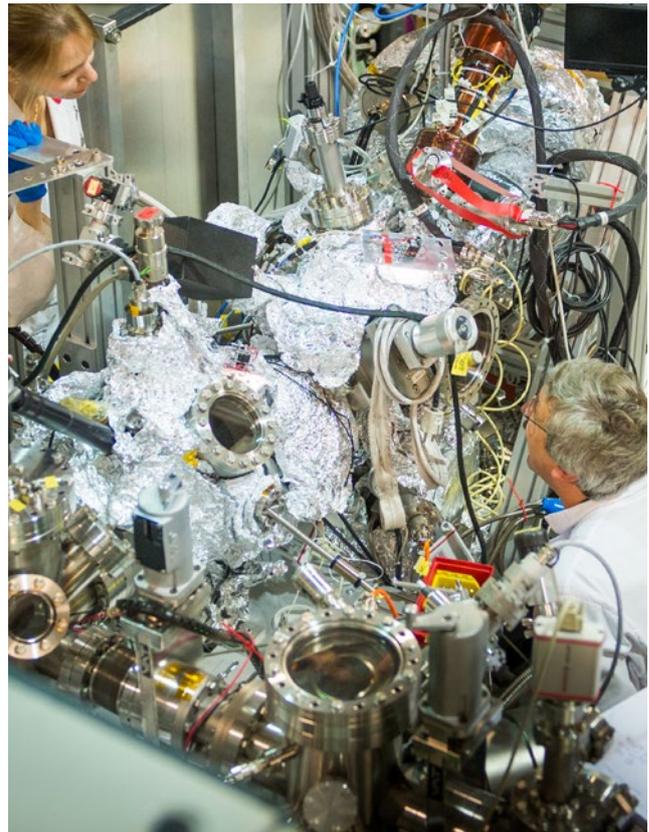
## Diffraktometrie

Auch diese Methode beruht auf der Tatsache, dass die Neutronenstrahlen an Einkristallen oder an Pulvern gebeugt werden. Die Pulverdiffraktometrie bildet über das Beugungsmuster die Struktur der Probe ab. Am FRM II stehen zusätzlich verschiedene Detektoren und Probenumgebungen zur Verfügung, die es erlauben, eine Vielzahl von Proben und verschiedenen Fragestellungen zu bearbeiten: Neben Kristallen ist auch die Untersuchung magnetischer Strukturen und Phasenübergängen möglich.

Ein anderes Diffraktometer dient dazu, Eigenstressungen in Bauteilen wie Schweißnähten zu messen, Superlegierungen zu qualifizieren oder globale und lokale Texturen zu analysieren. Ein angeschlossener Roboter erlaubt es bei diesem Gerät, auch sehr große und schwere Proben bis 30 kg zu untersuchen.

## Positronen

Positronen sind wegen ihrer kleinen Masse und weil sich ihre kinetische Energie genau einstellen lässt hervorragend geeignet als Sonde für die Untersuchung von Oberflächen. Beim Zusammentreffen von einem Positron mit einem Elektron entsteht ein Paar, das nach einer charakteristischen Lebensdauer wieder vernichtet wird. Die dabei auftretende Strahlung lässt genaue Rückschlüsse auf die lokale Umgebung der Vernichtungsstelle zu. So lassen sich selbst so geringe Fehlstellenkonzentrationen von bis zu 1:10 Millionen feststellen. Auch diese Methode arbeitet zerstörungsfrei und aktiviert die Probe nicht. Sie ist beispielsweise geeignet zur Untersuchung von Materialverschleiß.

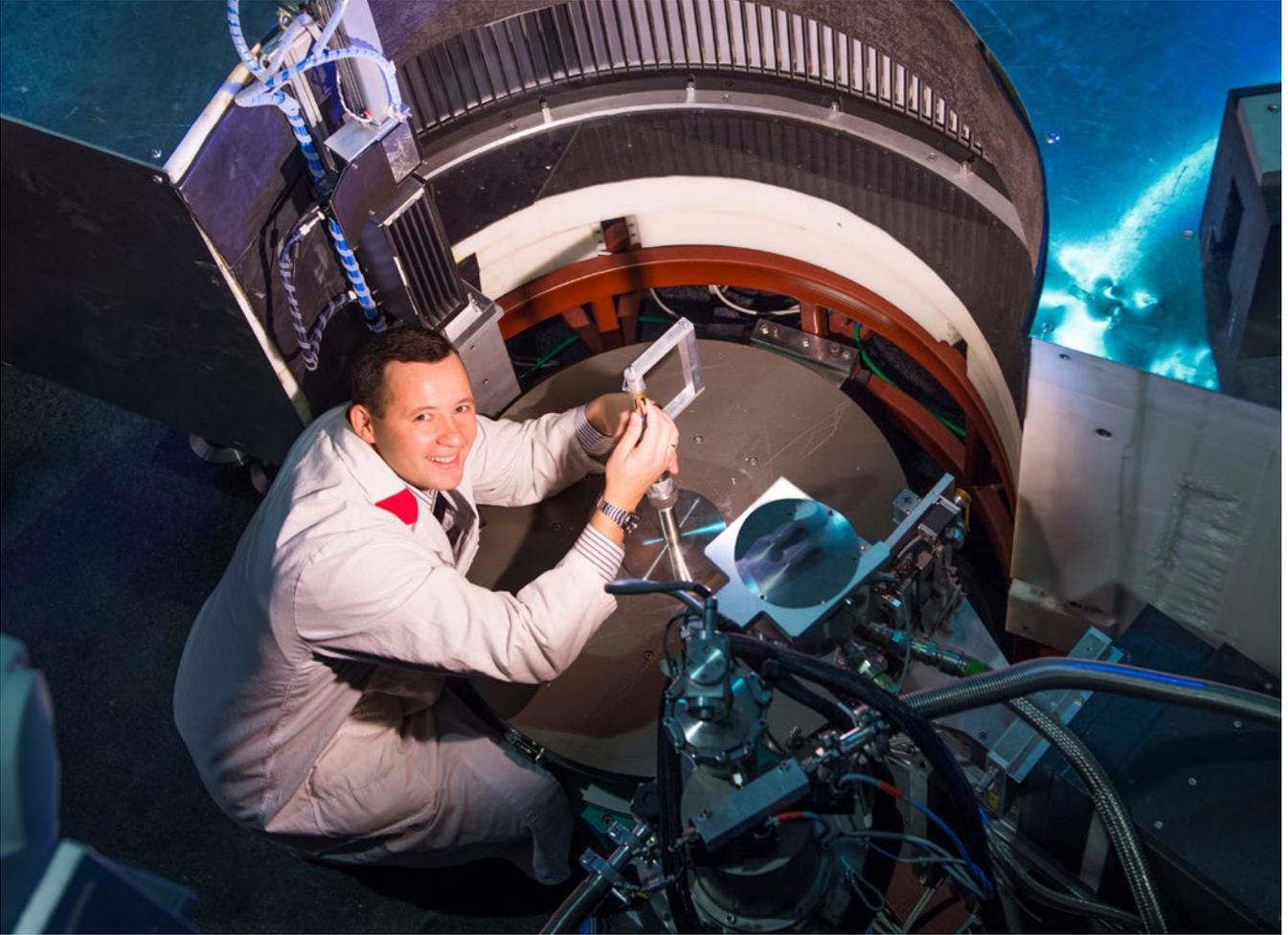


Die weltweit intensivste Positronenquelle befindet sich am FRM II.



Messinstrumente in der Experimentierhalle.





**Energie**

## Batterien beim Beladen zusehen

Lithium-Ionen-Akkus werden heute in vielen tragbaren Geräten mit hohem Energiebedarf eingesetzt: Handys, Taschenlampen, Digitalkameras und Notebooks sind nur einige Beispiele. Sie kommen aber auch in Elektroautos als Energiespeicher zum Einsatz oder gelten als Zwischenspeicher für Erneuerbare Energien. Um ihre Lebensdauer zu erhöhen oder den Beladeprozess zu beschleunigen, wird weiter an den Akkus geforscht. Neutronen bieten sich hierfür geradezu an. Sie können die Akkus zerstörungsfrei in-situ, also z.B. während des Beladeprozesses, durchleuchten und die Prozesse im Inneren abbilden. Weil Neutronen sehr empfindlich Lithium unter anderen Elementen nachweisen können, sind sie die Untersuchungsmethode der Wahl für Lithium-Ionen-Akkus.

Eine Reihe von Forschungsprojekten beschäftigt sich am FRM II mit der Batterieoptimierung:

- EEBatt der Technischen Universität München (TUM) zur Entwicklung eines Batterie-Energie-Speichersystems,

- ExZellTUM der TUM, das die Herstellung von Lithium-Ionen-Akkus als Energiespeicher für Elektroautos weiter erforschen soll,
- und das Projekt „Electric Fatigue in Functional Materials: „in operando“ investigation of fatigue in commercial batteries“ der Technischen Universität Darmstadt und des Karlsruher Instituts für Technologie. Letztere beobachteten etwa, dass Lithiumionen sich anders in die Graphitanode einlagern als bisher gedacht\*.

Am Heinz Maier-Leibnitz Zentrum gibt es eine Vielzahl von wissenschaftlichen Instrumenten, die zur Untersuchung der verschiedensten Batterien und Akkumulatoren eingesetzt werden. Je nach Art der Analyse, kommt eine andere Methode zur Anwendung.



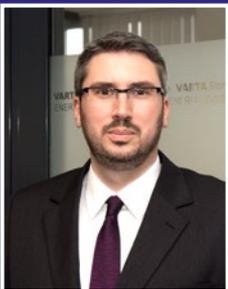
Batterieforschung am Strukturpulverdiffraktometer SPODI.

Folgende Methoden und Instrumente stehen am FRM II für die Batterieanalyse zur Verfügung:

- Zerstörungsfreie Strukturaufklärung, z.B. von Lithium-Ionen-Akkus mit einem Strukturpulverdiffraktometer (SPODI): In-Situ-Messung der Strukturen bei verschiedenen Ladungszuständen.
- Informationen über Partikelgröße (1- 300 nm) und deren Größenverteilung sowie die Form von Strukturen (auch Poren) und ihrer Veränderung während des Alterungsprozesses bzw. der Be- und Entladung können an SANS-1 gewonnen werden.
- Radiographie an den Instrumenten ANTARES und NECTAR: Sie zeigen Bilder aus dem Inneren von Batterien z.B. wie homogen die verschiedenen Komponenten vorliegen (auf der Skala > 50 Mikrometer).
- Ortsaufgelöste in-situ Diffraktion zur Phasen- und Strukturaufklärung am Instrument STRESS-SPEC. Der hohe Fluss sowie der Flächendetektor ermöglichen es, den Ladestand der Anode einer Batterie „live“ mitzuverfolgen und so neue Erkenntnisse über Prozesse in der Batterie während des Be- und Entladens, beispielsweise bei verschiedenen Entladegeschwindigkeiten oder unter Extrembedingungen zu gewinnen.
- Das Instrument REFSANS ermöglicht die tiefsensitive Information über laterale Strukturen in dünnen Schichten von Batterie-Elektroden mit Objektgrößen von 10-200 nm und einem lateralen Abstand der Objekte von 50-500 nm zu messen. So können z.B. Informationen über Nanomaterialien gewonnen werden, die an der TUM als Anodenmaterial in Li-Ionen Batterien vorgesehen sind.
- Die Methode der Prompten Gamma Aktivierungsanalyse kann für die Bestimmung der Zusammensetzung und Konzentration der Ionen in Elektroden (ppm-Bereich) eingesetzt werden. So kann beispielsweise am Instrument PGAA die Auflösung von Übergangsmetallionen aus der Kathode als Folge der Zellalterung untersucht werden.
- Mit Positronen am Instrument NEPOMUC sind Elektrodenmessungen möglich, um die Alterung der Elektroden zu bestimmen, die sich durch Defektdichteänderungen zeigen.

*\*Publikation:*

*A. Senyshyn et al., J. Electrochem. Soc., 5, 3198 (2013).*



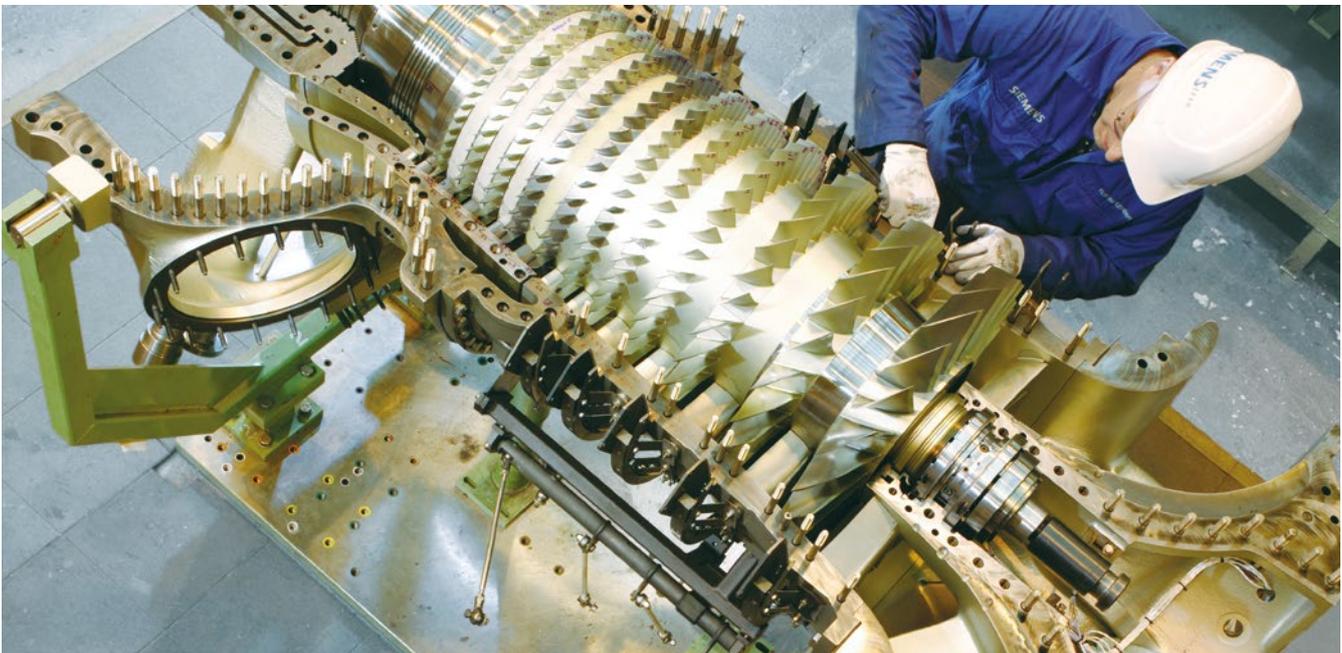
**Dr. Alexander Hirnet, Technischer Leiter bei Varta Storage, Nördlingen**

*„Wir haben bei Neutronen den großen Vorteil, dass wir wegen ihrer geringen Wechselwirkung direkt in die Batteriezellen hineinsehen können. Und wir können im Gegensatz zu anderen Methoden die Messungen unter realeren Bedingungen durchführen.“*

## Hochtemperatur-Werkstoffe für Gasturbinen

Für Gasturbinen gilt: Je höher die Eintrittstemperatur des Brenngases, desto höher ist der Wirkungsgrad. Wissenschaftler der TU Braunschweig und der Technischen Universität München (TUM) suchen daher nach einer „Superlegierung“, die für bis zu 1200 °C Betriebstemperatur einsetzbar ist. Wie groß das Interesse an diesem Ziel ist, zeigt sich daran, dass auch die Global Player der Industrie, Siemens und General Electric (GE), daran forschen. Eine neue Legierung muss mehrere Voraussetzungen erfüllen: Sie muss hitzebeständig, korrosionsbeständig und mechanisch belastbar sein und sie muss große Temperaturschwankungen mitmachen können. Superlegierungen gibt es auch heute schon, besonders bekannt sind die einkristallinen Nickelbasis-Legierungen, die durch Zusätze wie Molybdän, Tantal und Kohlenstoff zusätzlich gehärtet werden.

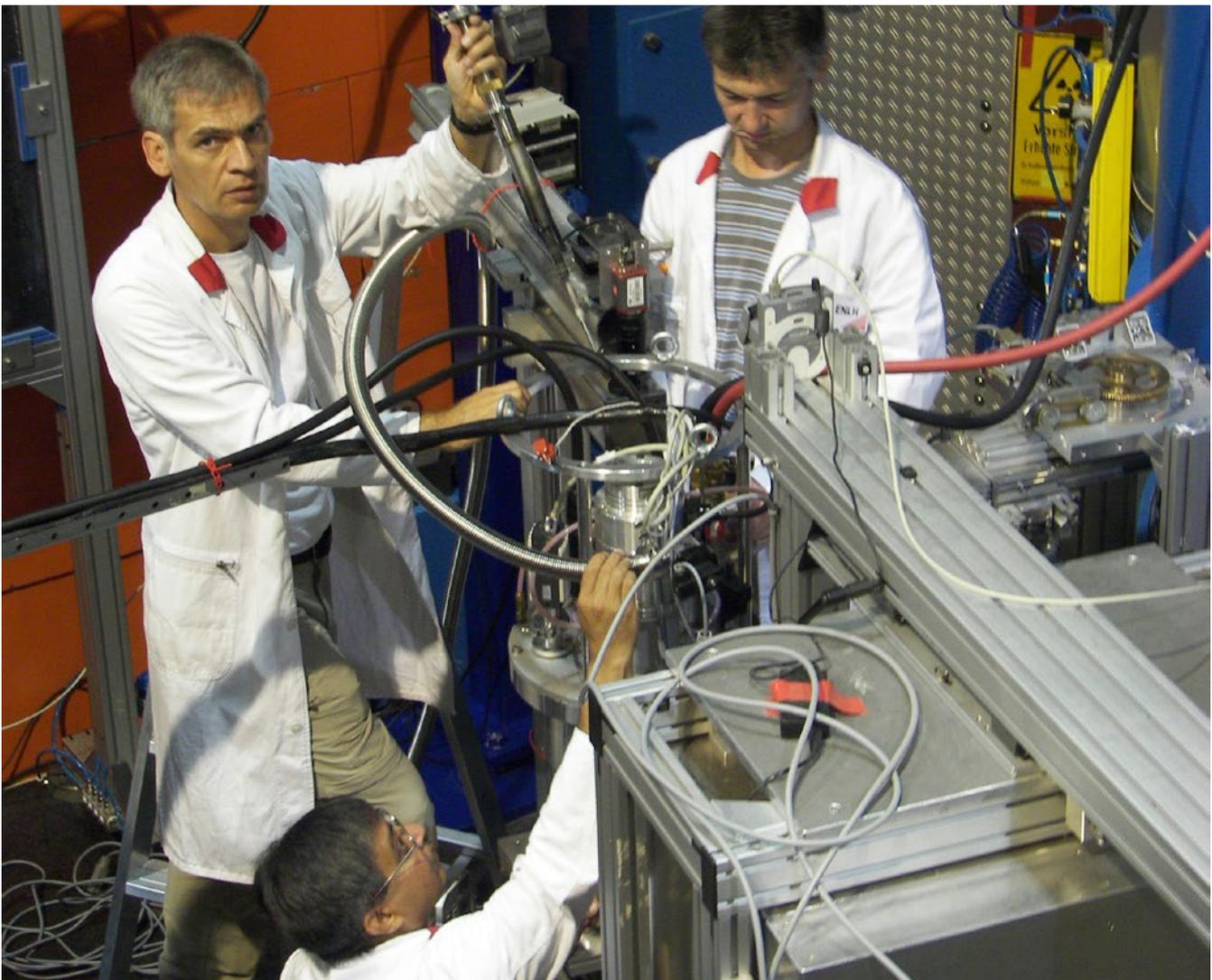
Neutronen sind eine ideale Methode, um neuentwickelte Legierungen zu testen. Die Legierungssysteme besitzen eine Matrix, in die winzige Ausscheidungen ( $< 1/10000$  Millimeter) zur Verstärkung der Legierung eingelagert sind. Diese Ausscheidungen verändern sich unter Temperatureinfluss und der Rotation einer Turbine. Neutronen zeigen diese kleinen Ausscheidungen in-situ bei hohen Temperaturen: sowohl die Größe als auch Anzahl und Form der Ausscheidungen. Diese Untersuchungen schließen beispielsweise Phasenumwandlungen und Strukturveränderungen der Legierung ein, die nur teilweise beim Abkühlen umkehrbar sind. Genau diese Mikrostrukturänderungen wollen die Wissenschaftler verstehen, um die Legierungsentwickler bei der Verbesserung der Legierung zu unterstützen. Die TU Braunschweig und die TUM setzen dabei auf ein Kobalt-Rhenium-Chrom System mit Ausscheidungen, die im Wesentlichen aus Tantal und Kohlenstoff bestehen.



Gasturbine der Firma Siemens.

Ein Teststand am FRM II erlaubt es, Legierungen nicht nur auf hohe Temperaturen aufzuheizen, sondern gleichzeitig die Fliehkräfte mit einer Zugmaschine zu simulieren. Völlig zerstörungsfrei zeigen die Neutronen, dass die neue Legierung in punkto Hitzebeständigkeit und mechanische Belastbarkeit sehr vielversprechende Werte besitzt.

Eine Strukturanalyse mit Neutronen macht sichtbar, dass Chrom als alleinige Beimischung zum Kobalt und Rhenium zwar stabile Strukturen bis 1000 °C garantiert, diese Legierung bei höheren Temperaturen aber instabil wird. Das Tantal in Form von Ausscheidungen stabilisiert die Legierung zusätzlich bis über 1200 °C, was die chemischen Elemente Kobalt und Rhenium alleine nicht garantieren können.



Messung an der neuen Legierung für Gasturbinen.

## Exakte Dotierung mit Neutronen

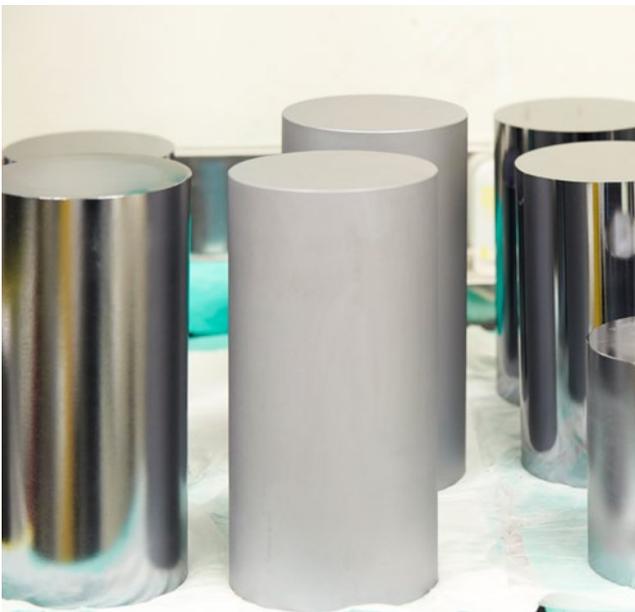
Ohne Halbleiterchips ist unser Alltag gar nicht mehr vorstellbar. Die meisten dieser Chips bestehen aus reinem Silizium, das selbst keinen Strom leitet, aber durch eine geringe Zugabe von Fremdatomen (die Dotierung) dazu befähigt wird. Halbleiter für Hochleistungselektronik verlangen eine durchgehende, extrem homogene Verteilung an Fremdatomen im reinen Siliziumkristall. Für die Zudotierung des Elements Phosphor wird dies durch Neutronen-Dotierung erreicht: Neutronen wandeln Silizium in einer Kernreaktion in Phosphor um.

Trifft ein langsames Neutron auf einen Siliziumkern mit der Massenzahl 30, so entsteht mit einer genau bekannten Wahrscheinlichkeit das instabile Silizium-31, das sich mit einer Halbwertszeit von zweieinhalb Stunden in Phosphor-31 umwandelt. Das Elegante an dieser Reaktion: Natürliches Silizium enthält etwa drei Prozent Silizium-30. Und der entstandene Phosphor ist nicht radioaktiv, das dotierte Silizium kann daher pro-

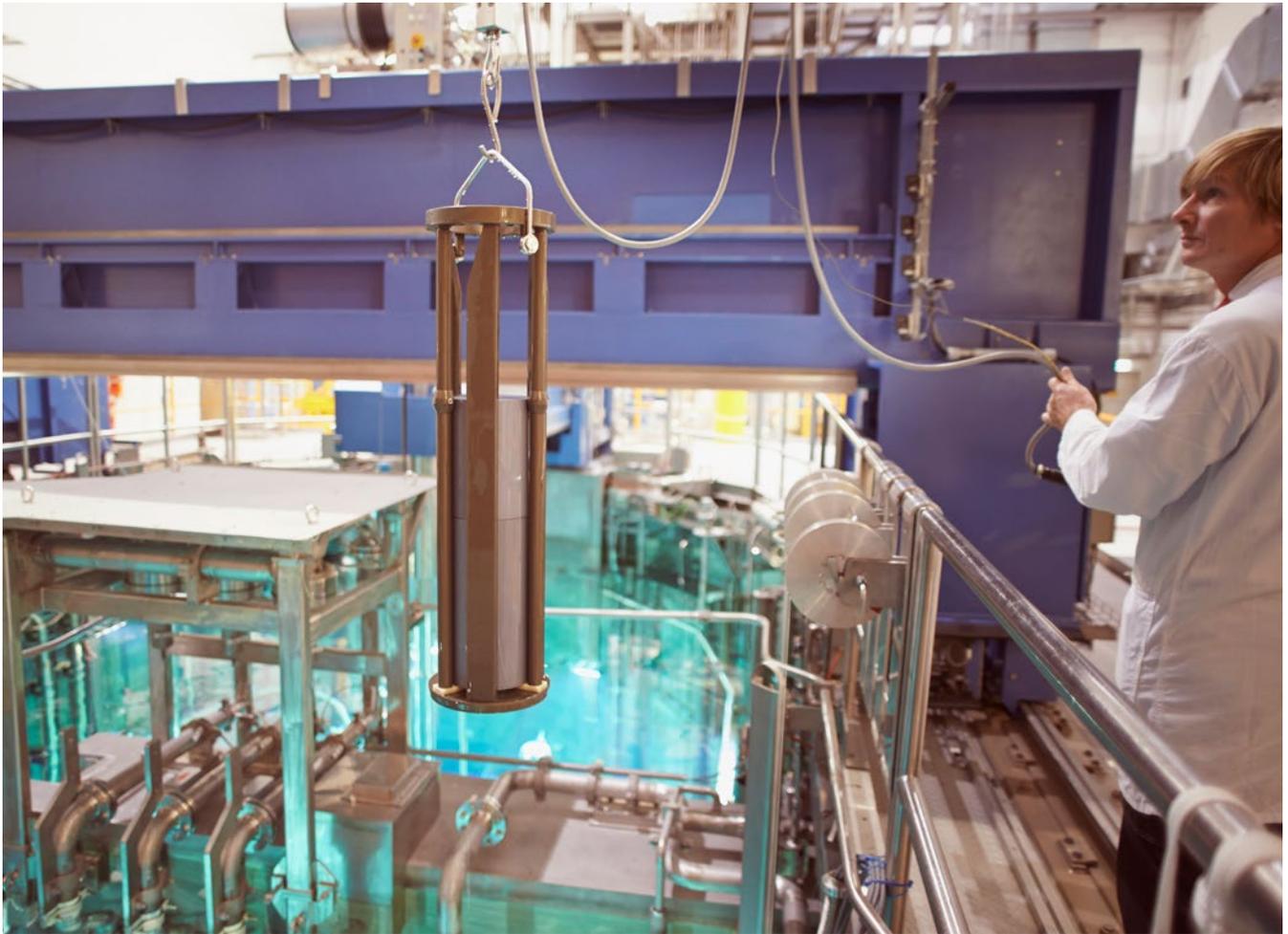
blemlos überall eingesetzt werden. Das Ergebnis ist ein Halbleitermaterial mit extrem homogener Verteilung der Dotierungsatome und wenigen Störungen im Kristallgitter, ideal für Hochleistungs-Bauteile. Die Neutronenquelle FRM II der Technischen Universität München eignet sich für diese Art der Dotierung besonders gut, da in ihrem Spektrum fast keine schnellen Neutronen vorkommen. Denn stößt ein schnelles Neutron mit einem Silizium-Atom zusammen, so schießt dieses mit großer Wucht durch das Kristallgitter und produziert eine große Zahl von Gitterdefekten, die die elektrischen Eigenschaften des Halbleiters erheblich stören.

Schon in der Konzeptionsphase der Forschungs-Neutronenquelle wurden verschiedene Bestrahlungsplätze eingerichtet, an denen Proben für Forschung und Industrie mit Neutronen bestrahlt werden können. Der Bestrahlungsplatz für das Silizium ist der größte. In einem Rohr, einen Meter entfernt vom Reaktorkern, finden Siliziumstäbe von bis zu 20 Zentimeter Durchmesser und 50 Zentimeter Stapelhöhe Platz. Um eine homogene Bestrahlung zu erreichen, dreht sich der Korb mit den Silizium-Zylindern langsam um seine Achse. Doch auch in der Senkrechten ist der Neutronenfluss nicht ganz einheitlich. Die Wissenschaftler lösten das Problem mit einer lokal variablen Abschirmung für Neutronen: Sie ließen einen Nickelzylinder anfertigen, der an den Stellen mit höherem Neutronenfluss etwas dicker ist und dadurch die Abweichungen wieder ausgleicht.

Seit Februar 2007 besitzt der FRM II eine vollautomatische Be- und Entladeeinheit, mit deren Hilfe bis zu 15 t Silizium pro Jahr dotiert werden können. Seit 2009 läuft die Anlage wegen hoher Nachfrage im Zweischichtbetrieb.



Rund 12 Tonnen Silizium jährlich veredelt der FRM II.



Das Silizium wird zur Bestrahlung ins Reaktorbecken gebracht.



**Martin Græsvænge Hansen, NTD Process Owner, Topsil S/A, Dänemark**

*„We are proud that Topsil co-pioneered the industrial production of neutron transmutation doped (NTD) silicon which plays a key role in our modern society. NTD silicon outperforms any other silicon product available in terms of accuracy and variation of the phosphorus doping also measured as resistivity. This makes it suitable for the most advanced power semiconductor components inserted in e.g. power grids and electric trains. FRM II is an important and a highly valued supplier of the NTD service utilized for these products.“*

## Batterien für Hybridlokomotiven

Mit einer Hybridlokomotive plant General Electric (GE) die Energie beim Bremsen zurückzugewinnen und in einer Batterie zu speichern. Die Lokomotive wird deshalb mit neuartigen Natrium-Metallchlorid-Batterien laufen und dabei mindestens zehn Prozent Energie einsparen und der Lokomotive kurzzeitig bis zu 2000 PS zusätzlich zur Verfügung stellen. Natrium-Metallchlorid-Batterien haben eine hohe Leistungsdichte und geben eine sehr große Leistung ab, zudem sind die Ausgangsstoffe deutlich preiswerter als die von Lithiumionenakkus.

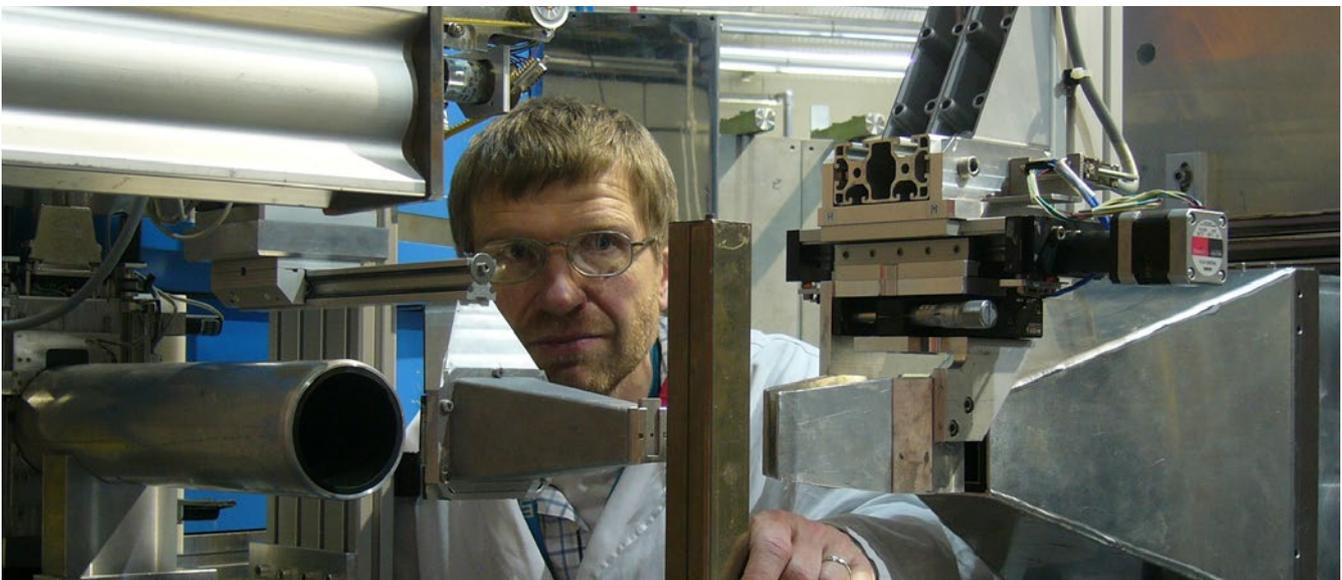
Der genaue Mechanismus und die Verteilung der Natriumionen während des Be- und Entladens waren jedoch noch unbekannt. Ein weiteres Problem: Durch das Eindringen von Feuchtigkeit und Luft verändern sich die höchst reaktiven Inhaltsstoffe beim Öffnen der Batterie. Die Kooperationspartner FRM II und GE durchleuchteten deshalb die Batteriezelle mit Hilfe des Instruments ANTARES (Advanced Neutron Tomography and Radiography Experimental System) während

verschiedener Ladungszustände. Der entscheidende Vorteil dieser Methode ist es, dass dazu weder die Batterie geöffnet noch zerstört werden muss. Die Neutronen-Radiographie zeigte den Füllstand des Natriums in der ungeöffneten Batterie während des gesamten Ladungsprozesses.

An einem zweiten Instrument der Forschungs-Neutronenquelle, dem Eigenspannungs- und Texturdiffraktometer STRESS-SPEC, analysierten die Wissenschaftler die Zusammensetzung der chemischen Stoffe in der Zelle. So erhielten sie eine genaue Aufschlüsselung über die Verteilung der verschiedenen Reaktionspartner in der Zelle. Das ist wichtig, um den Mechanismus der Lade- und Entladevorgänge in der Batteriezelle zu verstehen und zu optimieren.

### Partner:

GE Global Research  
Niskayuna, New York, USA



Eine Diffraktometrie gibt Auskunft über die Verteilung der Elemente in einer Batteriezelle.



Die Hybridlokomotive soll Bremsenergie zurückgewinnen.



**Yan Gao, Senior Scientist, GE Global Research, Niskayuna, New York, USA**

*„FRM II offers a wide range of neutron techniques from diffraction to imaging to spectroscopy. The scientists I have worked with at FRM II are dedicated, resourceful, and highly motivated to help solve real-world industrial problems. Our collaboration has been most rewarding: not only we improved our understanding on magnetic materials and sodium metal halide batteries; we also published three papers together!“*

## Wasserstoffspeicherung – eine Frage der cleveren Kombination von Methoden

Die Energiewende und der Wunsch, auf ressourcenschonendere Antriebstechniken umzusteigen, sind im Wesentlichen Fragen der Energieerzeugung, des Energietransportes und der Energiespeicherung. Ein potentieller Energieträger der Zukunft ist Wasserstoff. Er kann mithilfe regenerativer Energien erzeugt und zu einem späteren Zeitpunkt in Brennstoffzellen emissionsfrei wieder in elektrische Energie umgewandelt werden.

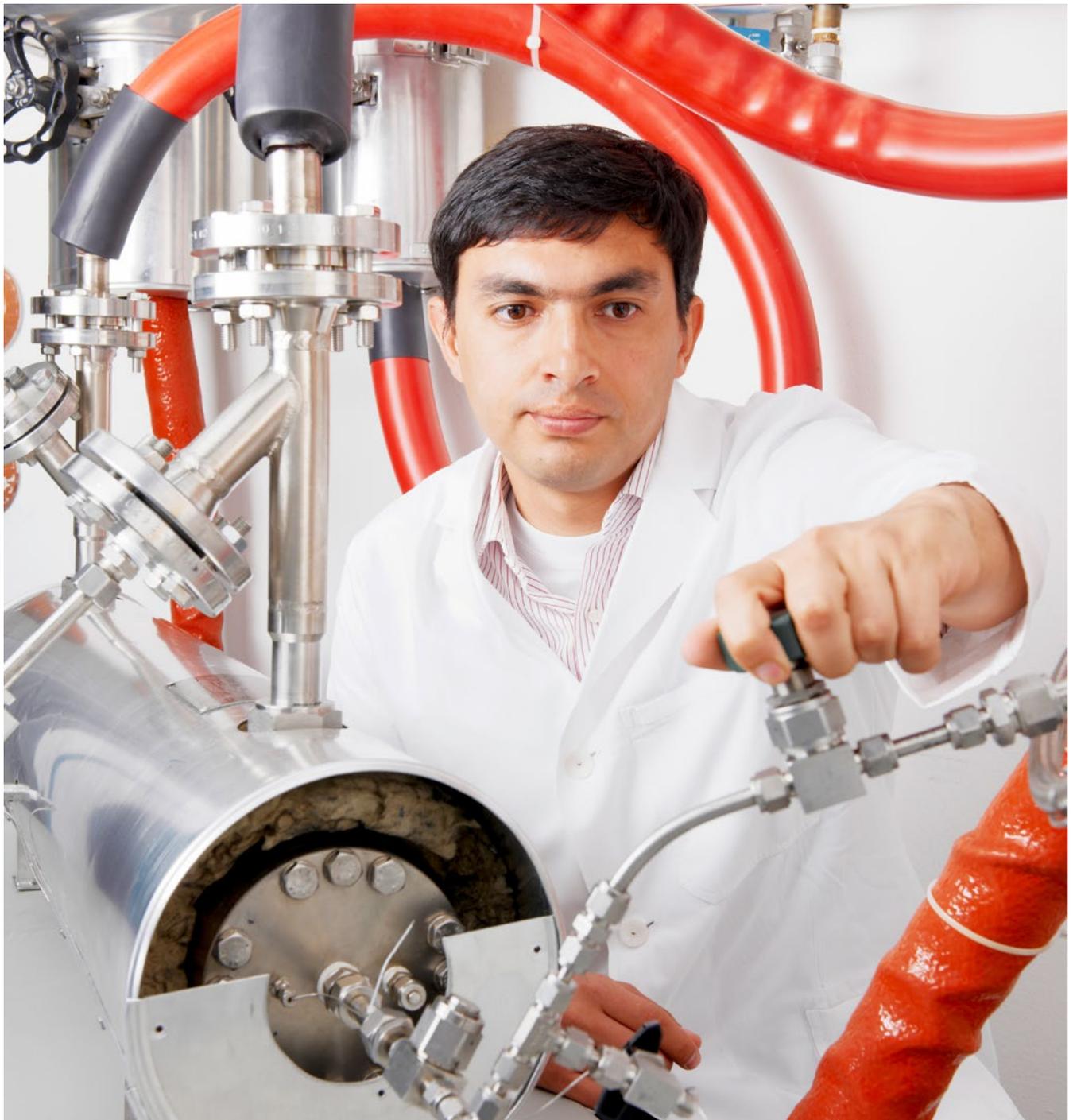
Eine Möglichkeit, Wasserstoff mit geringem Volumen und Gewicht zu speichern, ist ein Festkörperspeicher, in dem Wasserstoff chemisch gebunden vorliegt. Diese könnten langfristig die derzeitigen Speichermethoden von Wasserstoff als Gas in Druckgasflaschen (bis 700 bar  $H_2$ ) oder tiefkalten, flüssigen Wasserstoff ablösen. Neutronen sind besonders für Wasserstoff eine einzigartige Sonde, mit deren Hilfe grundlegende Fragen beantwortet werden können: Wie und wohin wandert er in den verschiedenen Stadien der Speicherung? Welche Materialien speichern besonders viel und welche Temperatur- und Druckbedingungen sind dabei einzuhalten?

Komplexhydride werden seit einiger Zeit als besonders aussichtsreiche Kandidaten für Wasserstoffspeichermaterialien untersucht, da sie eine hohe gravimetrische Speicherdichte haben. Ein solches Material (z.B. Natriumalanat,  $NaAlH_4$ ) kann Wasserstoff abgeben und wieder aufnehmen, indem geeignete Temperatur und (Wasserstoff)-Druckbedingungen gewählt werden. Im Idealfall ist dieser Prozess viele Male reversibel. Die Reaktionsgeschwindigkeit der Wasserstoffaustauschreaktion ist sowohl vom Material als auch von Temperatur und Druck abhängig. Mit Hilfe von Strukturbestimmungen (Pulverdiffraktometrie) kann die Wasserstoffaustauschreaktion als Funktion des Wasserstoffge-

haltes bzw. der Zeit untersucht werden. Damit können eventuelle Zwischenschritte der Reaktion identifiziert, und die Reaktionsparameter optimiert werden. Im Mittelpunkt stehen hierbei die Untersuchung von Katalysatoren bzw. Zusätzen, die die Austauschreaktion beschleunigen, und die Entwicklung von geeigneten Reaktionssystemen, d.h. die Kombination von verschiedenen Speichermaterialien, um die Betriebsparameter zu optimieren. Spektroskopische Methoden, wie die Neutronenflugzeitspektroskopie geben Auskunft über die Wasserstoffdynamik auf mikroskopischer Ebene, und helfen so, fundamentale Eigenschaften der Komplexhydride besser zu verstehen. Bildgebende Verfahren wie Neutronenradiographie und -tomographie liefern detaillierte Bilder aus dem Inneren von Prototyp-Tanks und erlauben die Charakterisierung der Stabilität des Pulverbetts und der Wasserstoffverteilung, beides wichtige Schlüsselkriterien für das Tankdesign.



Mit dem Flugzeitspektrometer TOFTOF wird die Dynamik von Wasserstoff untersucht.



Wasserstofftank des Helmholtz-Zentrums Geesthacht beim Test.





## Technologieentwicklung

## Dem Wasser in der Isolierung von Flugzeugen auf der Spur

Aus der Atemluft der Fluggäste entstehen innerhalb von sechs bis zehn Jahren Flugeinsatz bis zu mehrere hundert Kilogramm Wasser, die durch die Kabine in die Isolierung des Flugzeugrumpfes dringen und sich an der kalten Außenwand als Wasser oder Eis niederschlagen. Sie entsprechen dem Gewicht von mehreren Passagieren und kosten zusätzlichen Treibstoff. Auch die Isolierung selbst leidet unter der Feuchtigkeit: Sie isoliert schlechter und schimmelt, außerdem können Kurzschlüsse in der Elektrik entstehen. Trotz spezieller Isoliermaterialien und ausgeklügelter Wasserleitsysteme im Flugzeugrumpf muss die Isolierung je nach Flugzeugtyp und -nutzung immer wieder ausgetauscht werden.

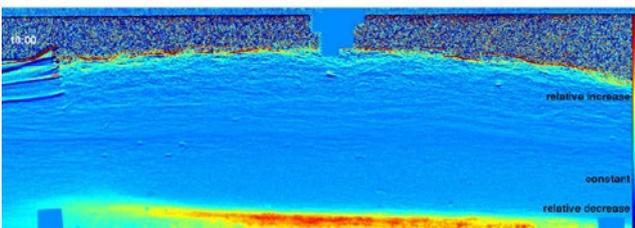
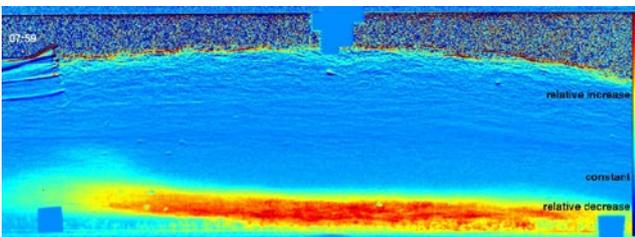
Am Institut für Thermofluidodynamik der TU Hamburg-Harburg (TUHH) sucht man deshalb gemeinsam mit dem Industriepartner XRG Simulation GmbH nach neuen Lösungen. Durch den Einsatz maßgeschneiderter, physikalisch basierter Computermodelle hilft die XRG Simulation GmbH, Produkte in der Energietechnik zu opti-

mieren. Computersimulationen ermöglichen Einblicke in technische Systeme, die messtechnisch nur mit großem Aufwand oder gar nicht zugänglich sind. Ein Beispiel hierfür ist die Isolierung von Flugzeugen. Zur Optimierung der Flugzeugisolierung ist es wichtig zu wissen, wie genau sich das Wasser in der Isolierung niederschlägt, ob es den Umweg über den flüssigen Zustand nimmt oder sofort gefriert und wo es sich ansammelt: in der Isolierung oder an der Außenwand.

Konventionelle Messtechniken, z.B. aus der Bauphysik, liefern eine schlechte oder gar keine Auflösung der Wasserverteilung. Deshalb entstand ein neuer Versuchstand der TUHH, der die Isolierung bei den verschiedenen Temperatur und Feuchtigkeitsverhältnissen während eines Transatlantikfluges simuliert. Anschließend untersuchten die Wissenschaftler die Isolierung mit Neutronen am Radiographie- und Tomographieinstrument ANTARES der Technischen Universität München, um zu sehen, wo sich Wasser oder Eis während der Steigphase, dem Flug, dem Sinkflug und der Bodenphase befinden.

Die Neutronen treffen auf die verschiedenen Materialien der Flugzeugwand, von Wasser werden sie am meisten abgebremst. So entstanden mit Hilfe einer Spezialkamera Bilder, die mit hoher räumlicher Auflösung die Wasserverteilung in der Isolierung während der verschiedenen Flugphasen abbilden. Das Ergebnis hilft der Überprüfung und Verbesserung von Simulationen zur Vorhersage der Wasserverteilung und damit bei der Weiterentwicklung der Flugzeugisolierung.

**Partner:**  
XRG Simulation GmbH  
Hamburg



Die Radiographie zeigt die Verteilung des Wassers in der Isolierung: von höherer Konzentration (rot) bis zu niedrigerer Konzentration (blau).



Ein Airbus A 380 auf dem Vorfeld des Flughafen München.



**Dr. Stefan Wischhusen, Geschäftsführer XRG Simulation GmbH, Hamburg**

*„An die von uns erstellten Simulationsmodelle werden hohe Anforderungen gestellt. Wir sind deshalb auf einen Abgleich mit detaillierten Messungen angewiesen. Die Neutronenspektroskopie war dabei ein wichtiger Bestandteil unserer Untersuchung der Feuchtigkeit in der Flugzeugisolierung. Sie haben Einblicke ermöglicht, die mit konventionellen Messtechniken aus der Bauphysik nicht machbar gewesen wären. Durch die auf diese Weise abgestimmten Modelle konnten neue zukunftsweisende Konzepte von Isolierungsaufbauten entwickelt werden, die die Kondensation deutlich verringern.“*

## Neuartiger Farblöser reinigt Pinsel ohne Lösungsmittel

Die meisten Reiniger für Farb- oder Klebstoffrückstände im Bau- und Heimwerkerbereich bestehen überwiegend aus flüchtigen organischen Lösemitteln, die umwelt- und gesundheitsschädliche Komponenten freisetzen. Es sollte ein Ersatz gefunden und getestet werden, der es erlaubt, diese schädlichen Anteile entscheidend zu verringern oder ganz darauf zu verzichten.

Jülicher Forscher hatten die Idee, anstelle der Lösungsmittel sogenannte Mikroemulsionen einzusetzen. Das sind Mischungen aus wässrigen und öligen Bestandteilen sowie einer großen Menge von Tensiden – einer zu großen für einen praktischen Einsatz. Deshalb hatten die Forscher einen Zusatzstoff aus der Klasse der sogenannten Blockcopolymeren im Auge, durch den die



Auch Graffiti können mit Hilfe des neuen Farblösers leichter entfernt werden.

Tensidmenge gesenkt werden konnte. Denn in früheren Experimenten hatten sie gemeinsam mit Kollegen der Universität Köln herausgefunden, dass Blockcopolymere die Effizienz von Tensiden vervielfachen können. Die Blockcopolymere waren zwar wirkungsvoll, jedoch nicht auf dem Markt erhältlich, zu teuer in der Herstellung und biologisch schwer abbaubar.

Die Wirkungsweise des Blockcopolymers hatten die Forscher mithilfe von Neutronenstreuexperimenten an den Kleinwinkelstreuanlagen



Der mit Neutronen entwickelte Farblöser ist im Fachhandel erhältlich.

KWS-1 und KWS-2 entschlüsselt, zunächst in Jülich, dann am FRM II. Diese zeigten, dass sich die Blockcopolymere an der Grenze zwischen Öl und Wasser einlagern. Sie versteifen so die Grenzschicht zwischen den wässrigen und öligen Bereichen der Mikroemulsionen. Dadurch verringert sich die Membranfläche und der Bedarf an waschaktiven Substanzen sinkt. Sie fanden ähnliche Eigenschaften bei den Tensiden, die aber kommerziell verfügbar, preisgünstig und biologisch leicht abbaubar sind.

Auch die ausgewählten Rohstoffe testeten die Forscher im Neutronenexperiment auf die gewünschten Eigenschaften und optimierten dann die Zusammensetzung der Mikroemulsion. Die Rezeptur wurde in Zusammenarbeit mit dem mittelständischen Unternehmen Bernd Schwegmann GmbH & Co. KG weiter optimiert. So entstand erstmals ein Farblöser, der mit einer geringen Tensidmenge und ohne Zusatz von organischen Lösemitteln auch schwerlösliche Farb- und Lackreste sowie Ruß, Teer und Klebstoffe entfernt. Der neue Reiniger wurde von der Alfred Clouth Lackfabrik GmbH & Co. KG aus Offenbach am Main auf den Markt gebracht.

#### Partner:

Bernd Schwegmann GmbH & Co. KG  
Grafschaft-Gelsdorf

Die Industrie entwickelt permanent neue Werkstoffe und Komponenten, um den Materialien neue und oft auch ganz spezifische Eigenschaften zu verleihen. Häufig sind dazu auch völlig neue Produktionsverfahren nötig, deren Bedingungen Auswirkungen auf die fertigen Bauteile haben. Beispielsweise beeinflussen Umformverfahren die Mikrostruktur des Materials und damit die Eigenschaften der fertigen Teile. Schlimmstenfalls können bei solchen Prozessen Eigenspannungen entstehen, die zu Rissen in den Bauteilen führen. Die Messung und Analyse von Eigenspannungen in Prototypen ist also enorm wichtig für die spätere kostengünstige Produktion von stärkeren oder leichteren Komponenten. Dafür haben sich Methoden der Neutronenbeugung vielfach bewährt. Sie gewähren detaillierte Einblicke in die Textur und die phasenspezifischen Eigenspannungen von Bauteilen, ohne dass diese dabei zerstört oder unbrauchbar werden. Sie können nach der Analyse für weitere Untersuchungen genutzt werden.



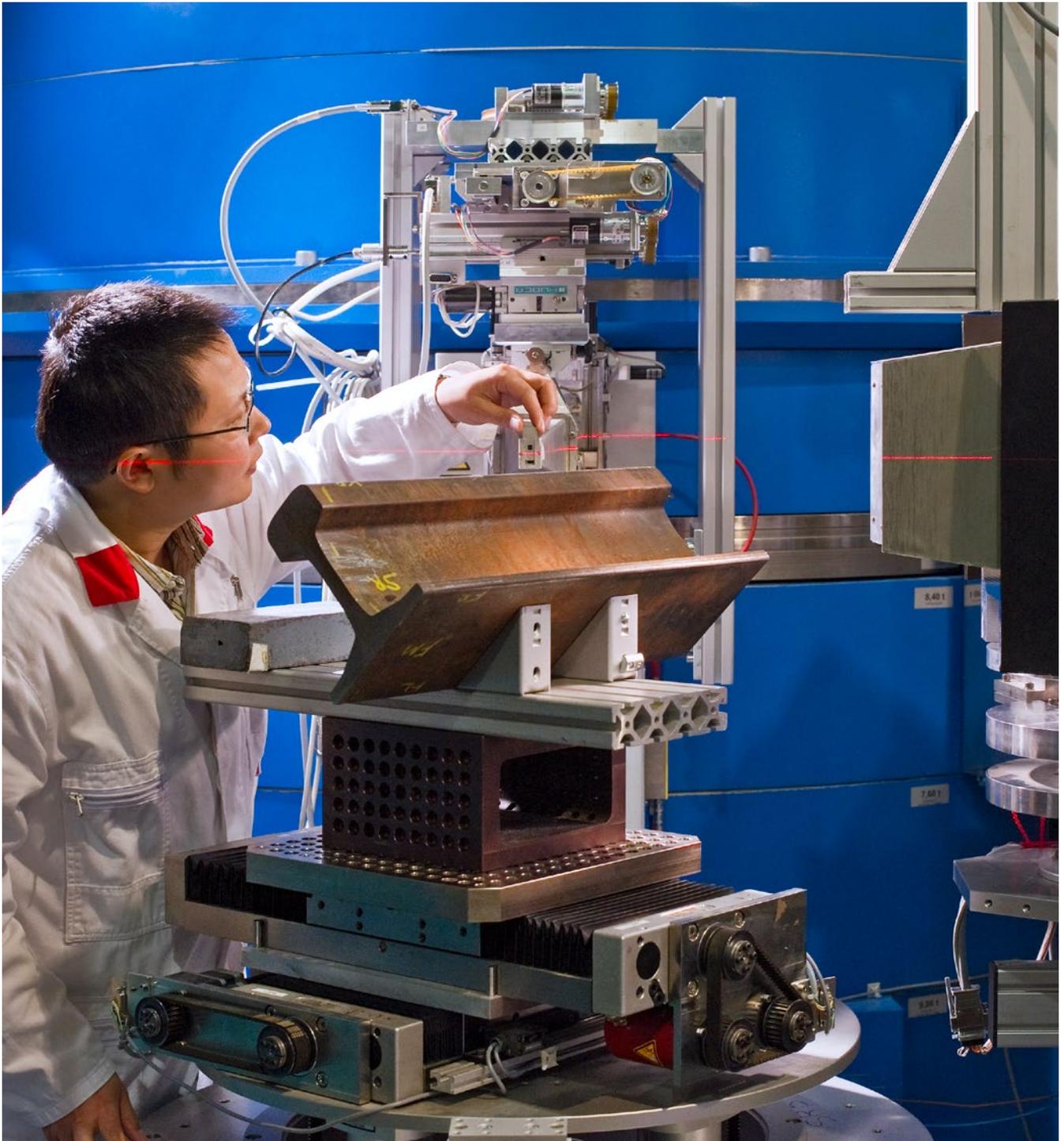
Mit einem Roboter werden die Proben am Instrument STRESS-SPEC gehandhabt.

Das Neutronendiffraktometer STRESS-SPEC eignet sich durch seine sehr flexible Konfiguration für Textur- und Eigenspannungsanalysen. Es ermöglicht eine kombinierte Analyse der globalen Beschaffenheit und der lokalen Textur in einer Vielzahl von Materialien wie Metallen, Legierungen, Verbundwerkstoffe, Keramiken und geologischen Materialien. Die quantitative Texturanalyse von neuen Materialien ist wichtig, um ihr anisotropes (richtungsabhängiges) Verhalten studieren zu können und die technologischen Verfahren wie Tiefziehen, Biegen, Metalldrücken usw. bereits im Vorfeld zu optimieren. Der Hauptvorteil der Neutronenbeugung gegenüber der Röntgenbeugung ergibt sich aus der Tatsache, dass die Wechselwirkung von Neutronen mit dem Material ziemlich schwach ist. Die Eindringtiefe der Neutronen ist etwa  $10^2$  -  $10^3$  -mal größer als bei der Röntgenbeugung. Ein weiterer Vorteil ist die relativ einfache Probenvorbereitung.

Beim Hydroformen etwa werden metallische Rohre in einem geschlossenen Werkzeug durch einen hohen Innendruck hergestellt. Das Material wird dabei nach außen gedrückt. Der Prozess soll eine gleichmäßige Wandstärke gewährleisten. Neutronenexperimente an solchen Rohren zeigten, dass alle Rohre eine Texturvariation über den gesamten Umfang aufwiesen, der aus der grobkörnigen Mikrostruktur des Barrens und dem Erhitzungsprozess stammt. Mit dieser Information konnte ein Herstellungsprozess entwickelt werden, der den hohen Qualitätsanforderungen an solche Rohre gerecht wird.

### Partner:

Prof. Dr. rer. nat. Dr.-Ing. habil.  
Heinz-Günter Brokmeier  
Institut für Werkstoffkunde und Werkstofftechnik  
Technische Universität Clausthal



Eine Eisenbahnschiene wird auf innere Spannungen untersucht.

## Betonhärtung: Was macht das Wasser im Zement?

Die mechanischen und chemischen Eigenschaften von Beton hängen wesentlich von dem festigkeitsgebenden Calciumsilikathydrat (C-S-H) ab. Um diesen Prozess durch die verwendeten Ausgangsmaterialien, Zement, Wasser und Zusatzstoffe, im Hinblick auf Kosten und mechanische Eigenschaften zu optimieren, muss der Ablauf der Wasserbindung im Detail verstanden werden.



Der ausgehärtete Zement nach der Messung mit Neutronen.

Herkömmliche Methoden der Strukturuntersuchung mit Röntgenstrahlen und Kernspinresonanz geben zwar einen Aufschluss über die atomaren Strukturen, erlauben aber keinen hinreichend genauen Einblick in den Ablauf der Wasserbindung. Einen Fingerabdruck der sich bildenden Phasen konnte mit der Neutronenspektroskopie gewonnen werden, da der sich einlagernde Wasserstoff mit unterschiedlichen Frequenzen schwingt. Diese Schwingungen wurden im Laufe des Aushärtungsprozesses während 36 Stunden gemessen.

Am MLZ kam hierbei das Instrument TOFTOF zum Einsatz. Die Wissenschaftler vom Centrum für Baustoffe und Materialprüfung der TUM untersuchten gezielt die Reaktion von Tricalciumsilikat mit Wasser. Zu Beginn der Reaktion wird ein Anstieg des Anteils an physikalisch gebundenem Wasser beobachtet. Dies führen die Wissenschaftler auf die Bildung einer frühen Form des Calciumsilikathydrats zurück, das eine besonders große spezifische Oberfläche von etwa  $800 \text{ m}^2$  pro Gramm aufweist. Wie viel Wasser im weiteren Prozess physikalisch gebunden wird, hängt im Wesentlichen von zwei Faktoren ab: der Bildung von weiterem frühen Calciumsilikathydrat, das die Gesamtoberfläche vergrößert, sowie deren Reduzierung durch Verkettung des C-S-H.

Das Verständnis dieses Aushärtungsvorgangs ermöglicht nun gezielt diesen Prozess zu beobachten und den Einfluss der Zusatzstoffe zu untersuchen, um damit die Betoneigenschaften zu optimieren.

### Partner:

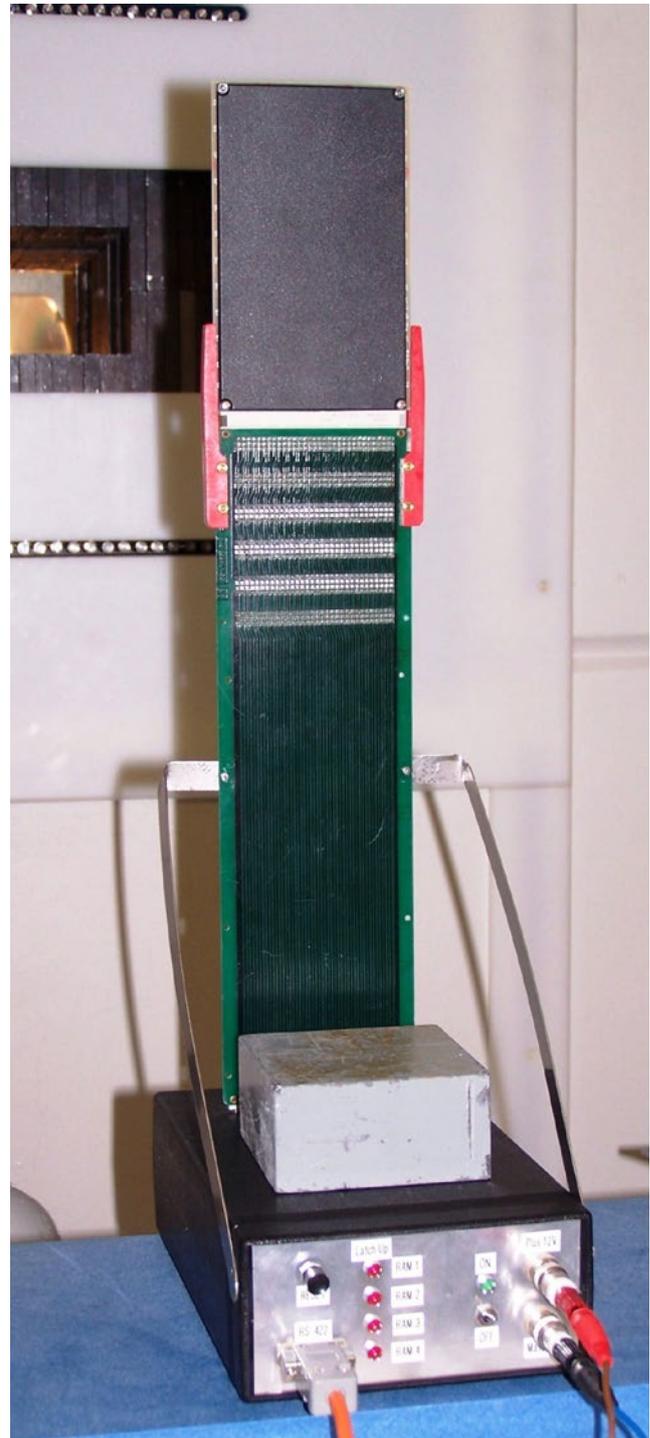
Centrum Baustoffe und Materialprüfung  
Technische Universität München



Der Probenhalter enthält den Zement.

MedAustron verwendet eine innovative Form der Strahlentherapie, die Ionentherapie. Dabei werden Tumore mit geladenen Teilchen, entweder Protonen oder Kohlenstoffionen, bestrahlt. Die Ionentherapie ist optimal zur Behandlung von Tumoren in der Nähe von strahlungsempfindlichen Organen, da die maximale Energieabgabe genau auf den Bereich der Tumorerkrankung fokussiert werden kann. Ein wesentlicher Faktor bei der Behandlung ist die exakte Positionierung der Patienten, wofür ein weltweit einzigartiges Positionierungssystem zum Einsatz kommt. Das radART-Institut für Technologieentwicklung der Paracelsus Medizinischen Privatuniversität und die medPhoton GmbH entwickeln gemeinsam für EBG MedAustron GmbH ein innovatives Computer-Tomographie-System (CT), welches die Position des Tumors unmittelbar vor der eigentlichen Bestrahlung verifiziert und damit der hohen Präzision in der Patientenpositionierung gerecht wird.

Durch die Bestrahlung mit energiereichen Protonen werden im Patienten energiereiche Neutronen erzeugt, d.h. der Patient wird in dieser Zeit selbst zu einer „Strahlenquelle“, die umgebende elektronische Bauteile schädigen kann. Im medizinischen Routinebetrieb dürfen solche Bestrahlungseinrichtungen aber keinesfalls ungeplant ausfallen bzw. muss ein Ersatz bereitgehalten werden. Um den ungeplanten Ausfall einer Bestrahlungsanlage zu vermeiden, ist es wichtig zu wissen, wann Teile ausgetauscht werden müssen. Außerdem darf ein Ausfall elektronischer Komponenten den Patienten zu keinem Zeitpunkt gefährden. Beide Fragen konnten durch den experimentellen Aufbau am FRM II beantwortet werden, indem strahlenempfindliche Komponenten in der Bestrahlungseinheit SR10 des FRM II einer Neutronendosis ausgesetzt wurden, die einem klinischen Betrieb von 10 bzw. 25 Jahren



Chip bei der Testbestrahlung mit Neutronen.

entspricht. Anschließend wurde getestet, ob sie noch einwandfrei funktionieren beziehungsweise das jeweilige „Verfallsdatum“ bei der angenommenen Neutronendosis festgelegt.

Auch Bildsensoren von Kameras müssen für verschiedene Anwendungen resistent gegenüber Partikelstrahlung sein. Das gilt für Sensoren, die in der Raumfahrt eingesetzt werden, aber auch für solche, die in der Forschung in Detektoren verwendet werden. In dem großen internationalen Projekt „Compressed Baryonic Matter“ bei FAIR, Darmstadt, werden solche Sensoren verwendet. Sie wurden nach der Bestrahlung mit schnellen Reaktorneutronen nach den entspre-

chenden Kriterien getestet und können so für ihren Einsatzzweck optimiert werden.

#### Partner:

radART-Institut  
(Institut für Technologieentwicklung in der Strahlentherapie der Paracelsus Universität)  
EBG MedAustron GmbH,  
Wiener Neustadt, Österreich

Institut für Kernphysik, Goethe-Universität Frankfurt und das Institut Pluridisciplinaire Hubert Curien (IPHC), Frankreich



**Dr. Bernd Möblacher, Geschäftsführer EBG MedAustron, Wiener Neustadt, Österreich**

*„In den Bestrahlungsräumen bei MedAustron werden Bauteile mit integrierten elektronischen Komponenten verwendet. Es war fraglich, ob die durch die Ionentherapie entstehende Neutronenstrahlung diese beschädigt oder in ihrer Funktion stört. Die Tests ermöglichten eine wertvolle Abschätzung der Komponentenbelastung durch Neutronen, welche maßgeblichen Einfluss auf die Bauteil- bzw. Systementscheidungen hatte. Die positiven Ergebnisse dieser Tests bestärken uns, in diese Richtung weiter zu entwickeln.“*

## Spannungen in Stahl gegossen

Eigenstressungen entstehen bei Verbundguss-Werkstücken, wenn sich zwei verschiedene Metalle beim Abkühlen unterschiedlich ausdehnen. Dies führt im schlimmsten Fall zu Rissen in den späteren Zylinderlaufbuchsen von Fahrzeugen. Diese Spannungen während des Abkühlens an einer Verbundgussform aus Aluminium und Stahl wurden erstmals mit Neutronen in-situ untersucht.

Neutronen am Instrument STRESS-SPEC, die auf die Atome der Alu- und Stahllegierungen

trafen, maßen die Dehnung beim Abkühlen im Atomgitter und ließen so völlig zerstörungsfrei Rückschlüsse auf die Spannung im gesamten Werkstück zu. Das Ergebnis der Wissenschaftler des Lehrstuhls für Umformformtechnik und Gießereiwesen der Technischen Universität München zeigte: Spannungen, die einer Last von bis zu 20 Kilogramm pro Quadratmillimeter entsprechen, treten erst ab einer Abkühl-Temperatur von 350 °C auf. Die Ursache: Das Aluminium zieht sich beim Abkühlen doppelt so stark zusammen wie der Stahl. Sichtbar werden diese enormen



Messungen an Verbundgusswerkstücken verbessern die Simulationsmodelle der Gießereindustrie.

Kräfte lediglich durch wenige Hundertstel Millimeter, um die sich die Stahlhülse beim Abkühlen verformt.

In der Gießereiindustrie wird bei der Fertigung der Zylinderlaufbuchsen ein Computerprogramm verwendet, das die Spannungen in Werkstücken aus zwei Metallen simuliert. Die Ergebnisse der Messungen am FRM II zeigten, dass dieses Programm einen wichtigen Faktor nicht berücksichtigte. Es berechnete die Spannungen drei Mal höher als sie tatsächlich waren. Denn die Simulation lässt außer Acht, dass der Aluminiumring im Versuchszylinder sich durch Kriechprozesse noch ein wenig an den härteren und sich geringer zusammenziehenden Stahlkern anpasst.

Inzwischen wurde ein verallgemeinertes Computermodell für temperaturabhängige Kriechprozesse entwickelt, das die Spannungen zwischen den Metallen abschwächt. Die Gießereiindustrie hat daran großes Interesse.

**Partner:**

Prof. Dr.-Ing. Wolfram Volk  
Lehrstuhl für Umformtechnik und Gießereiwesen  
Technische Universität München

**Dr. Andreas Fent, Leiter Planung Druckguss, BMW Group, Landshut**



*„Bei der Entwicklung des Magnesium/Aluminium-Verbund-Kurbelgehäuses für den 6 Zylinder-Benzinmotor haben sich neben den Eigenspannungen durch den Materialverbund auch die Anbindung zwischen Magnesium-Umguss und Aluminium-Einlegeteil als kritisch herausgestellt. Sowohl die Eigenspannungen im Bauteilinneren als auch die Anbindung (Anm.: durch Imprägnieren mit Kunstharz, das wasserstoffhaltig und damit stark kontrastierend zum Aluminium und Magnesium ist) konnten in der Entwicklungsphase nur mit Neutronen gemessen, bzw. geprüft werden. Auf Basis dieser Messungen konnten dann serientaugliche Prüfverfahren entwickelt und auch verifiziert werden. Mittlerweile ist die Produktion des Verbundkurbelgehäuses nach 2,3 Mio. Stück, ohne nennenswerte Produktionsprobleme, ausgelaufen. Das Projekt wäre ohne die Ergebnisse aus dem Forschungsreaktor nicht oder kaum durchführbar gewesen.“*





## Qualitätssicherung

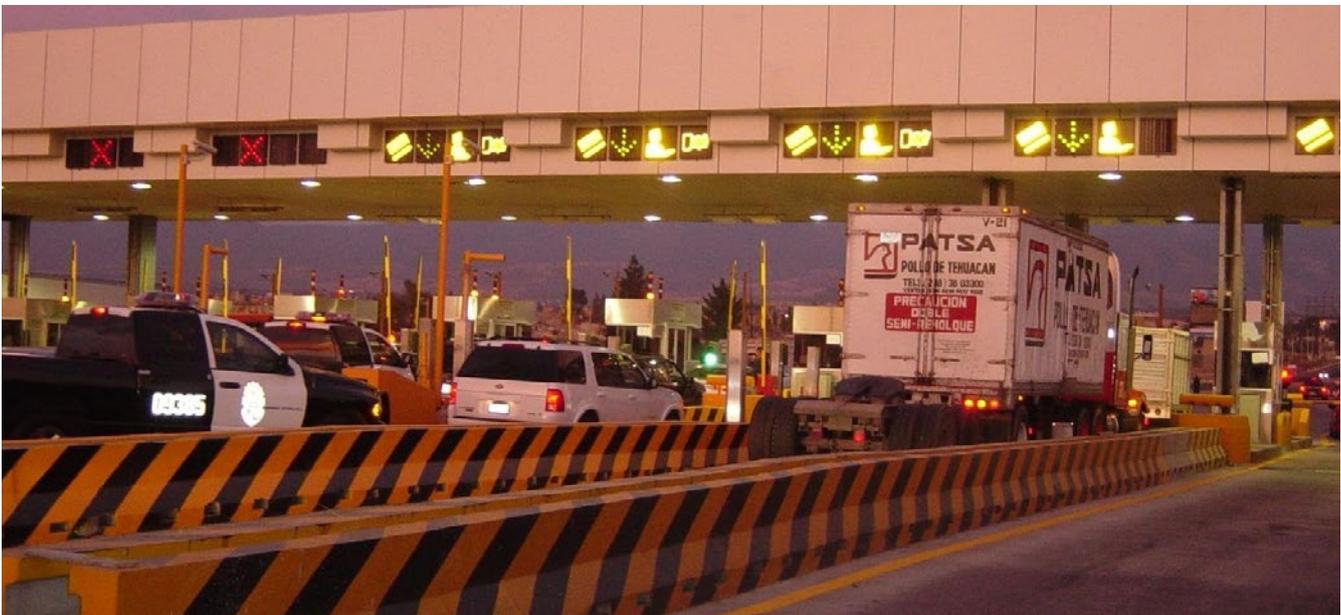
## Boräquivalent als Maßgröße für Verunreinigungen

Graphit wird in der Industrie in großen Mengen eingesetzt, beispielsweise als Elektrodenmaterial für Batterien, für Filterzwecke oder auch in kerntechnischen Anlagen als Reflektor- und Moderator material. Technischer Graphit enthält meist Verunreinigungen mit anderen Elementen wie Chrom, Eisen, Nickel, Mangan, Blei und Bor, die den Verwendungszweck stark einschränken. Bei Graphit, das in kerntechnischen Anlagen eingesetzt wird, stört besonders die Verunreinigung mit Bor wegen des hohen Absorptionsquerschnitts für thermische Neutronen.

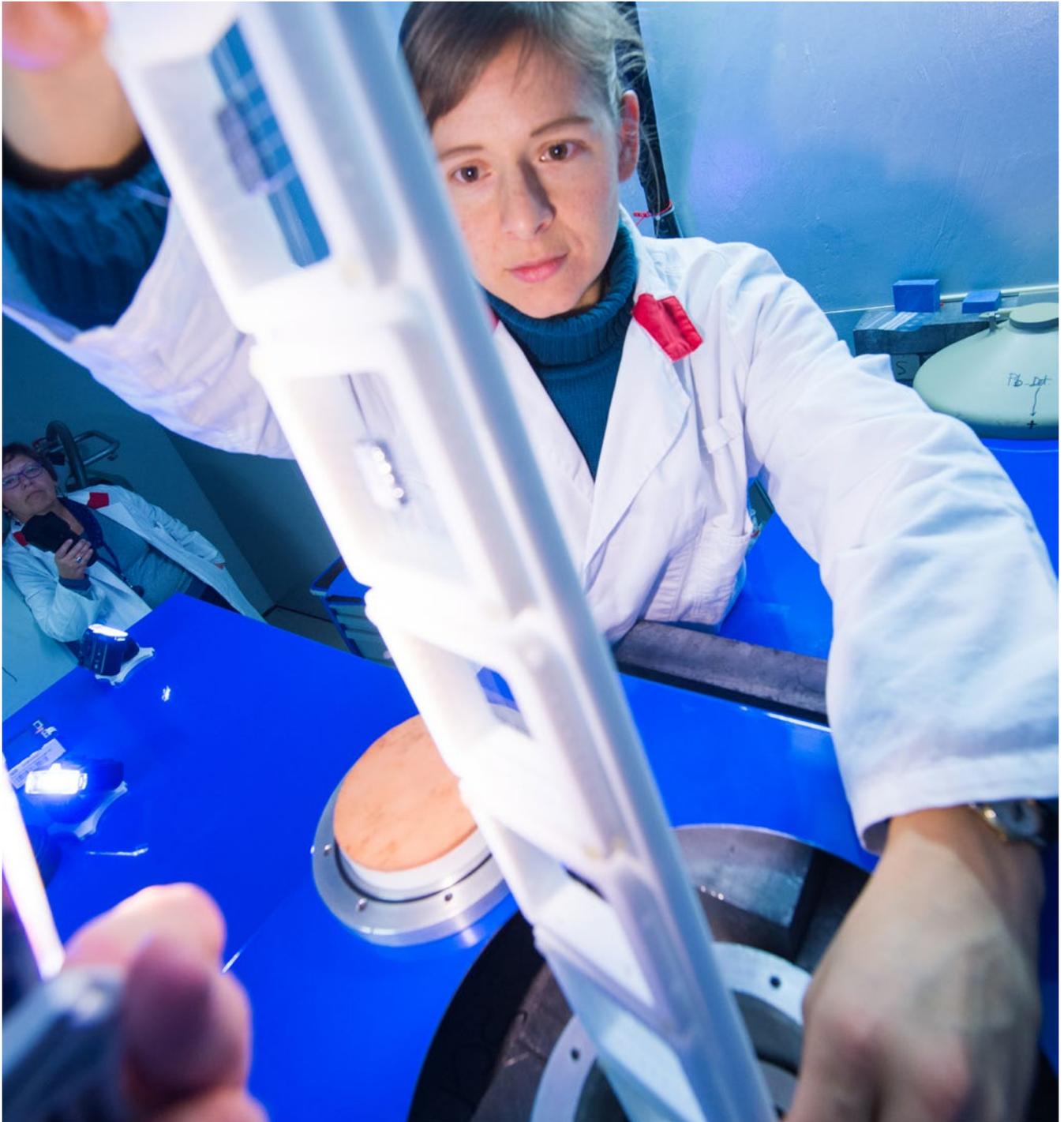
Der Handel von kerntechnikrelevantem Material wird international streng kontrolliert. Graphit darf deshalb nur als „nuklearreiner“ Graphit und mit besonderen Auflagen exportiert werden. Nuklearreiner Graphit ist Graphit mit einem Reinheitsgrad, der einem sogenannten Boräquivalent von weniger als 5 ppm entspricht, und mit einer Dichte von über  $1,50 \text{ g/cm}^3$ . Eine genaue Bestimmung des Boräquivalents ist deshalb für viele indust-

rielle Verwendungszwecke wichtig, manchmal sogar gesetzlich vorgeschrieben. Dafür kommen sowohl die Neutronenaktivierungsanalyse (NAA) und Prompte Gamma Aktivierungsanalyse (PGAA) in Frage.

Der FRM II verfügt über eine Reihe von Bestrahlungskanälen für die Neutronenaktivierung und ermöglicht eine Multi-Elementanalyse durch die Kombination von NAA und PGAA. Die PGAA ist für die Boräquivalent-Bestimmung am besten geeignet, weil die Methode auf der Messung der Elemente mit den größten Wirkungsquerschnitten für Neutronen beruht. Die NAA erlaubt eine genaue Messung aller Spurenelemente, ist aber bei den leichten Elementen wie Bor, Wasserstoff und Stickstoff nicht mehr präzise genug. Genau diese Elemente aber liefern den höchsten Beitrag für das Boräquivalent. Der Kunde bekommt deshalb mit einer PGAA-Analyse ein sehr umfassendes und nach Elementen selektiertes Ergebnis.



Der Handel mit Graphit wird international streng kontrolliert.



Die Prompte Gamma Aktivierungsanalyse findet Verunreinigungen in Materialien.

## Qualitätssicherung bei der Produktion von Autotüren

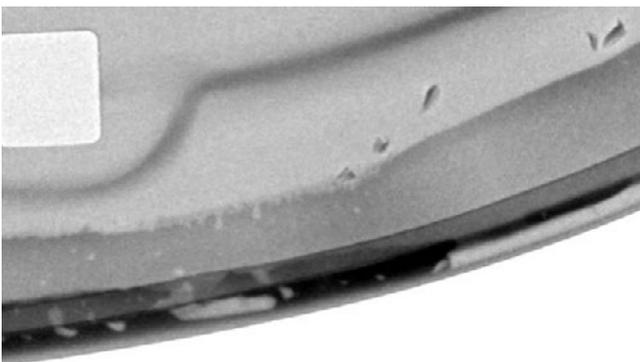
Eine Autotür besteht aus einzelnen miteinander verklebten Komponenten. Der Automobilkonzern Ford suchte nach einer Methode, um die Qualität dieser Verklebung zu kontrollieren. Es sollte sichtbar werden, ob sich für eine sichere Verbindung der Komponenten genug Kleber an der richtigen Stelle befand. Das gesuchte Verfahren sollte zerstörungsfrei, leicht zu handhaben und kostengünstig sein. Geeignete Methoden zur Prozessüberwachung schienen: Ultraschall, Thermographie und Röntgentomographie. Um die Empfindlichkeit der verschiedenen Methoden zu vergleichen, wurde eine spezielle Autotür präpariert.

Auch Neutronentomographie am Instrument ANTARES des MLZ kam zum Einsatz. Sie zeigte eine Lücke in der Klebefläche in sehr hoher Auflösung. Ebenso sind die einzelnen Klebefron-

ten deutlich zu sehen. Bei genauerem Hinsehen konnten auch kleine Inhomogenitäten im Bereich des Klebers im Millimeterbereich erkannt werden, die durch andere Methoden verborgen blieben.

Diese Aufnahmen dienten als Standard für die Fertigung, um günstigere und ebenso gut geeignete Methoden identifizieren zu können. Auch die Röntgenradiographie zeigte eine gute Auflösung, jedoch nicht so hoch wie die mit Neutronen. Ultraschall war das bisher verwendete Verfahren, hätte aber umständlich auf Autotüren angepasst werden müssen. Röntgenographische Verfahren wären grundsätzlich geeignet, jedoch sind die Bauteile zu groß für die üblichen Geräte.

**Partner:**  
Ford-Werke GmbH



Die Neutronenradiographie (links) zeigt eine Lücke in der Klebefläche. Rechts das Original.



Radiographien von großen Bauteilen sind am Instrument ANTARES möglich.

## Neutronenstrahlen zur Gesteinsanalyse und Produktion von Strahlenquellen

Die Bestrahlung mit Neutronen dient nicht nur der Elementanalyse (siehe Seite 56 Neutronenaktivierungsanalyse), sondern auch vielen anderen Zwecken. So bestimmen Geologen mit Hilfe neutronenbestrahlter Proben das Alter von Gesteinen. Darüber hinaus bietet der FRM II mit Hilfe des Bestrahlungsdienstes auch Produktionsverfahren für Produkte wie dotiertes Silizium (siehe Seite 28) oder Strahlenquellen für Mess- und Überwachungseinrichtungen an.

Geowissenschaftler aus aller Welt nutzen Neutronenbestrahlungen am FRM II für die Altersbe-

stimmung von Gestein. Die sogenannte Spaltspuranalyse wird beispielsweise eingesetzt, um mögliche Lagerstätten von Gas oder Öl zu identifizieren. Die in dem Gestein enthaltenen Mineralien Apatit und Muskovit weisen Spuren von Uran-238 auf. Der natürliche radioaktive Zerfall von Uran-238 hinterlässt Spuren, sogenannte Spaltspuren, die bei entsprechender Behandlung unter dem Mikroskop sichtbar werden. Aus der radioaktiven Halbwertszeit von Uran-238 und der Zahl der Spaltspuren pro Volumen kann das Alter des Gesteins bestimmt werden. Das Gestein enthält neben Uran-238 auch das Isotop Uran-235 in einem konstanten ursprünglichen Verhältnis. Am FRM II wird die Spaltung von Uran-235 durch Bestrahlung mit Neutronen ausgelöst. Die dadurch zusätzlich entstandenen Spaltspuren des Uran-235 ermöglichen die genaue Bestimmung der ursprünglich in den Mineralien enthaltenen Gesamturanmenge. Das Alter des Gesteins ergibt sich aus dem Verhältnis von natürlichen und künstlich erzeugten Spaltspuren.

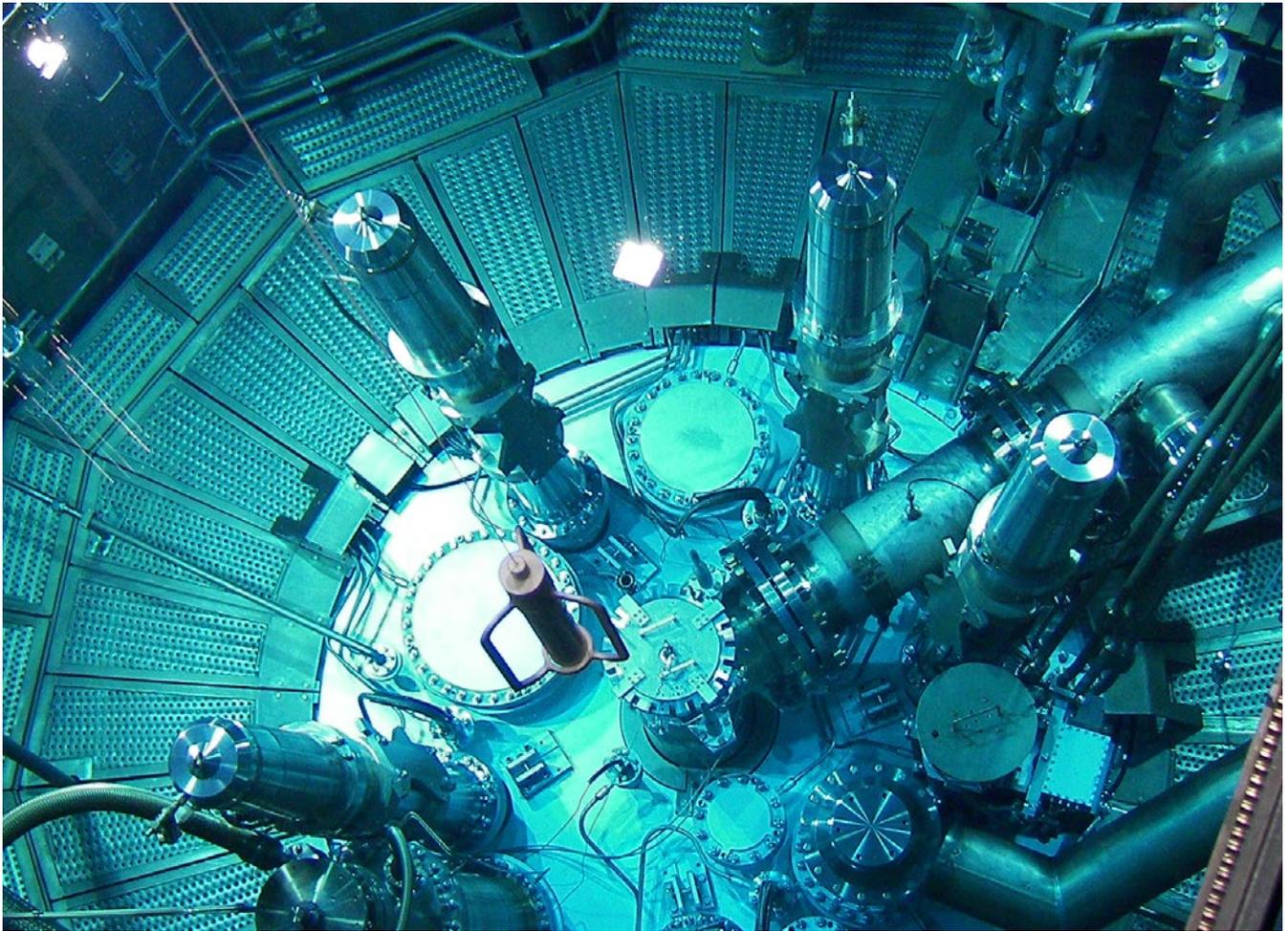
Radioaktive Quellen werden unter anderem für industrielle Anwendungen genutzt. Ein wichtiges Beispiel ist Kobalt-60, das durch Neutronenbestrahlung in der Kapselbestrahlungsanlage für die Eckert & Ziegler Nuclitec GmbH am FRM II hergestellt wird. Die auf diese Weise produzierten Quellen mit einer hohen Aktivität (mehr als 1 TBq/Jahr) werden von EZAG Nuclitec für Messgeräte zur Überwachung und Kalibrierung weiterverarbeitet. Eine weitere Anwendung radioaktiver Quellen ist ihr Einsatz als Marker für Messungen in optisch nicht zugänglichen Umgebungen, wie etwa in unterirdischen Pipelines.

### Partner:

Eckert & Ziegler Nuclitec GmbH, Braunschweig



In der Kapselbestrahlungsanlage wird Kobalt-60 hergestellt.



Um das Alter von Gesteinen zu ermitteln, wird häufig die Großvolumenbestrahlungsanlage benutzt.



**Stefan Hasselhuhn, EZAG Nuclitec GmbH, Braunschweig**

*„Wir lassen Kobalt am FRM II bestrahlen, um daraus Strahlenquellen für Industrieanwendungen herzustellen. Aufgrund des hohen Neutronenflusses am FRM II ist die Bestrahlung schnell abgeschlossen, sodass Zeit und Kosten gespart werden können. Wichtig ist für die Firma Eckert & Ziegler Nuclitec GmbH auch die relative Nähe zum FRM II: Innerhalb Deutschlands ist der Transport schnell und preisgünstig. Oftmals können wir mit der Bestrahlungsgruppe auch Termine auf Zuruf vereinbaren, was uns sehr entgegenkommt.“*

## Auf Reinheit geprüft

Mit der Neutronenaktivierungsanalyse (NAA) kann die Elementzusammensetzung einer Probe sehr genau bestimmt werden. Die NAA ist in vielen Fällen deutlich empfindlicher als eine konventionelle chemische Analyse. Je nach Zusammensetzung der Probe kann die NAA bis zu einem Atom unter einer Billion anderer entdecken. Sowohl Geologen als auch Umweltanalytiker oder Qualitätsmanager nutzen hierfür die Bestrahlungsanlagen der Forschungs-Neutronenquelle Heinz Maier-Leibnitz.

So wird regelmäßig Graphit auf seine Elementzusammensetzung überprüft (siehe Seite 50). Der Handel mit Graphit, das auch als Moderator in nukleartechnischen Anlagen verwendet werden kann, wird weltweit streng kontrolliert. Nur hochreiner Graphit kann in der Nukleartechnik verwendet werden. Eine Firma, die mit Graphit handelt, lässt am FRM II überprüfen, ob das Graphit mit Spurenelementen verunreinigt ist.

Auch Silizium wird mittels NAA auf seine Reinheit untersucht. Im Auftrag der Firma Topsil aus Dänemark werden Proben aus Siliziumkristallen, die für die Halbleiterindustrie bestimmt sind, in der Kapselbestrahlungsanlage bestrahlt. Die Elemente werden dabei unterschiedlich stark aktiviert und geben deshalb ein charakteristisches, messbares Muster ab. Auch bei Silizium geht es um die Reinheit des Produkts und damit um eine Qualitätssicherung des Fertigungsprozesses. Fremdatome im Silizium können bis hinab in in einen Konzentrationsbereich von ppb (parts per billion) und ppt (parts per trillion) nachgewiesen und quantifiziert werden.

Im Auftrag der Nationalen Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA), die sich in der Schweiz mit der Entsorgung radioaktiver Abfälle befasst, wurden Materialien, die in Kern-

kraftwerken und für Transportbehälter (z. B. vom Typ CASTOR) eingesetzt werden, mittels NAA auf ihre Haupt-, Neben- und Spurenbestandteile analysiert. Anhand der Analyseergebnisse können zuverlässige Aussagen über Art und Menge derjenigen radioaktiven Stoffe gewonnen werden, die beim Einsatz der Materialien durch Einwirkung von Neutronen produziert werden und später als radioaktiver Abfall zu entsorgen sind.

### Partner:

Semiconductor Materials A/S Topsil, Dänemark

Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA), Schweiz



Die Proben werden mit einer Rohrpost zur Bestrahlung in das Reaktorbecken gesandt.



Die zu bestrahlende Probe wird präpariert.

## Mit Neutronen dicke Bretter bohren

Die Bauindustrie setzt schon immer Holzkonstruktionen ein, in neuerer Zeit entstehen ganze Häuser aus hölzernen Fertigteilen. Bauteile enthalten neben Holz meist auch andere Bestandteile wie Kleber, Leim oder Metalle, die zu verschiedenen Zwecken untersucht werden müssen. Auch Archäologen finden oft Relikte, die aus Holz im Verbund mit anderen Materialien vorliegen.

Reines Holz kann meist ausreichend gut durch Röntgenstrahlung untersucht werden, Verbundmaterialien oder Holzschichten von mehreren Zentimetern Dicke stellen besondere Anforderungen. Eine vollkommene Barriere für Röntgenstrahlen bilden integrierte Metallplatten, wie sie an Verbindungsstellen von Holzbauwerken vorkommen. Transparent werden sie für Neutronen. Die Radiographie mit thermischen Neutronen kann für dünne Platten bis etwa 2 cm Dicke noch eingesetzt werden, bildet aber größere und dickere Holzteile wie Balken nicht mehr mit einer genügend großen Auflösung ab. In Zusammenarbeit mit der Bundesanstalt für Materialforschung haben Wissenschaftler am FRM II ein Verfahren entwickelt, um selbst große Volumina mit einer solchen gemischten Zusammensetzung zerstörungsfrei untersuchen zu können.

Die Radiographie mit schnellen Neutronen brachte den Durchbruch. Die Dicke der Probe kann bis zu 49 cm betragen, die Breite bis zu 23,5 cm und es zeigten sich weitere Vorteile: Schnelle Neutronen durchdringen sowohl Metalle, die mit dem zu untersuchenden Holzteil verbunden sind, und sie werden von wasserstoffhaltigen Materialien wie Kleber und ähnlichen absorbiert. Auch in Fällen, in denen beide Umstände zum Tragen kommen, entstehen noch Bilder in guter Auflösung. Schädigungen im Holz konnten z. B. in einem Bauteil einer Holzbrücke über die Donau in Dietfurt, die wegen Einsturzgefahr abgerissen werden muss-

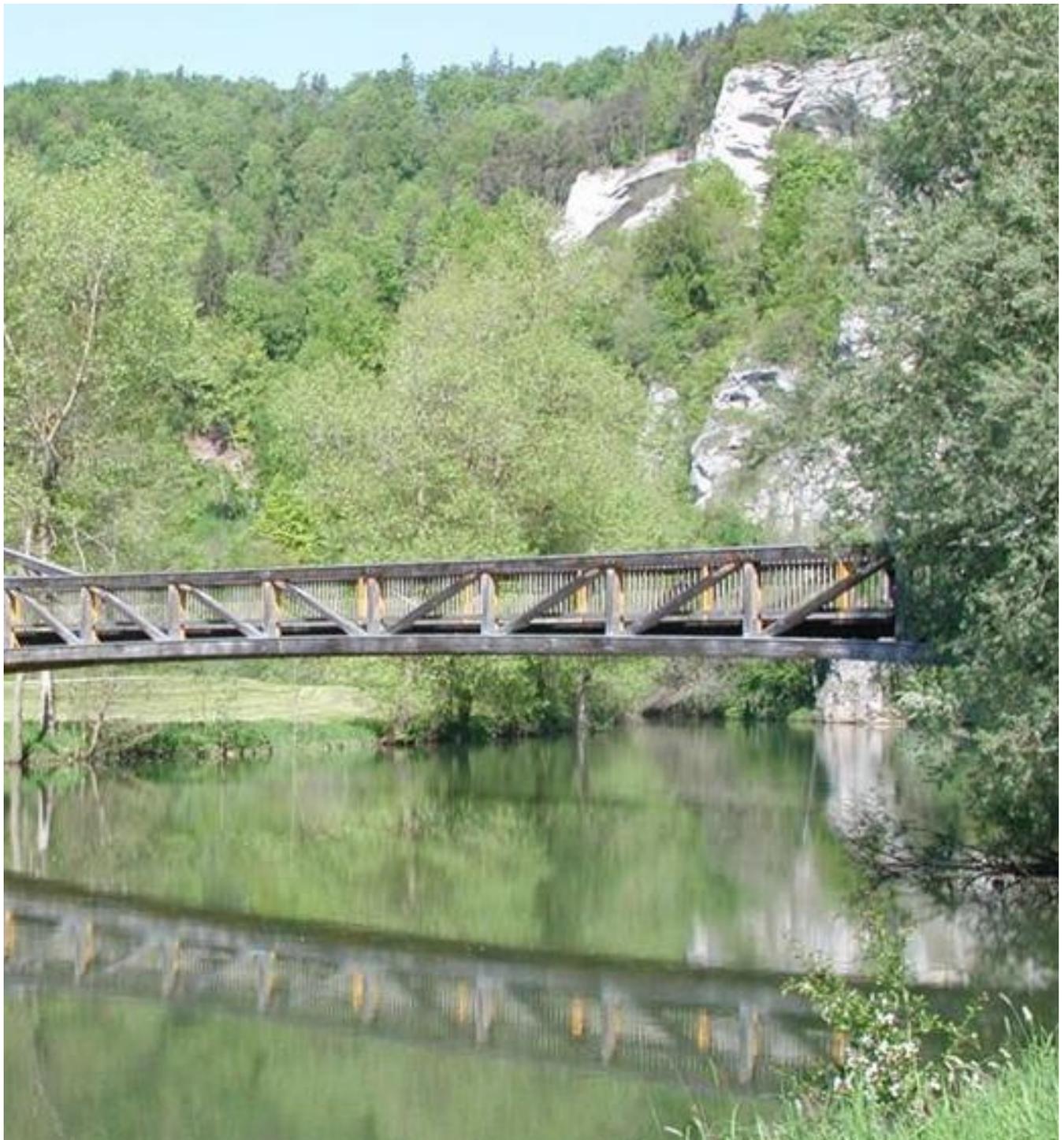
te, durch eine Stahlplatte hindurch erkannt werden. Eine ungleichmäßige Verteilung von Leim in einem Brettschichtholz wurde mittels einer Tomographie auch mit eingeschränktem Winkelbereich in einer Breite von 23,5 cm dargestellt. Mit schnellen Neutronen wurden so bei zwei sehr unterschiedlichen Materialeigenschaften sehr gute Ergebnisse erzielt.

### Partner:

Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM)



Neutronentomographie (rechts) für das hölzerne Verbindungselement mit Stahlplatte und Bolzen (links). Die hölzernen Strukturelemente senkrecht zur eingelassenen Stahlplatte sind gut zu erkennen.



Die schadhafte Holzbrücke über die Donau bei Dietfurt.





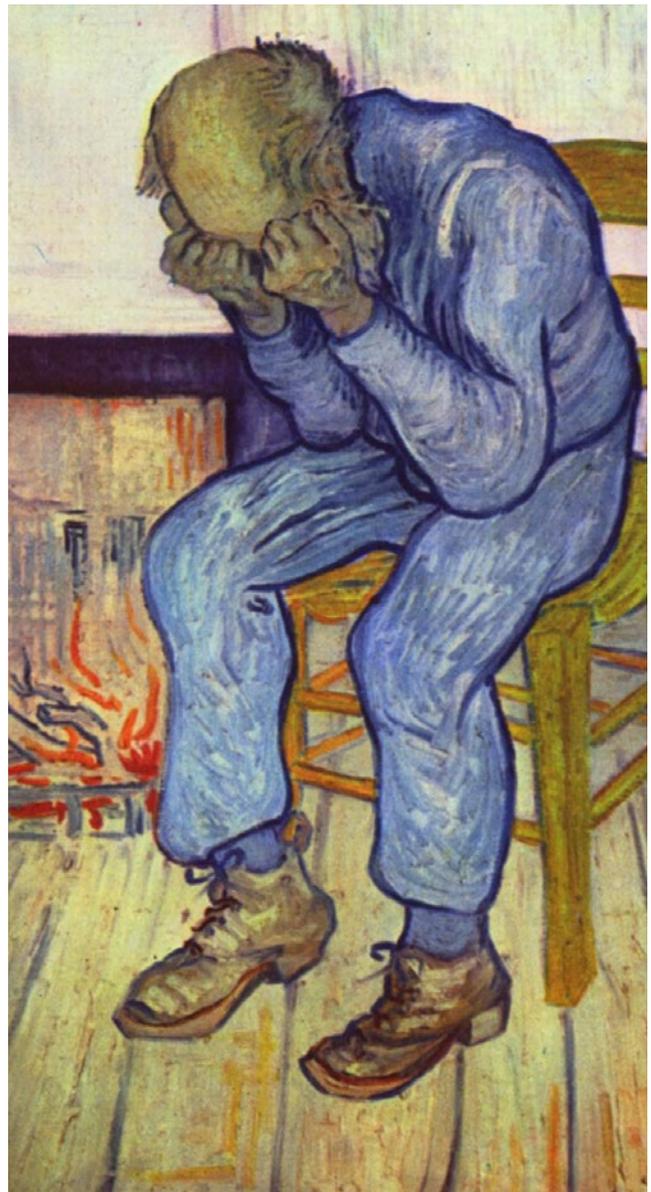
## Neutronen zeigen Anreicherung von Antidepressivum im Gehirn

Seit Jahrzehnten wird Lithium in der Behandlung bei verschiedenen psychischen Erkrankungen wie Depressionen, Manien und bipolaren Störungen eingesetzt. Die genaue biologische Wirkungsweise in bestimmten Gehirnregionen ist unbekannt, aber es hebt die Stimmung auf und senkt das Aggressionspotential. Mehrere internationale Studien haben gezeigt, dass ein höherer natürlicher Lithiumgehalt im Trinkwasser zu einer niedrigeren Suizidrate in der Bevölkerung führt. Lithium wird auch bei unbehandelten Personen im Gehirn eingelagert, es könnte deshalb durchaus ein essentielles Spurenelement für den Menschen sein.

Wissenschaftler der Technischen Universität München erhielten dreierlei Gewebeproben der Rechtsmedizin der Ludwig-Maximilians-Universität München (LMU): von Patienten, die mit Lithium behandelt wurden, von unbehandelten Patienten und von gesunden Vergleichspersonen. Diese setzten die Physiker der Prompten Gamma Aktivierungsanalyse am FRM II einem fokussierten kalten Neutronenstrahl höchster Intensität aus.

Lithium reagiert sehr spezifisch mit Neutronen und zerfällt in ein Helium- sowie ein Tritiumatom. Mit einem speziellen Detektor können deshalb so geringe Mengen wie 0,45 Nanogramm Lithium pro Gramm Gewebe gemessen werden. Die Ergebnisse erstaunen: Nur bei den Proben eines depressiven Patienten, der mit Lithium behandelt worden war, beobachteten die Wissenschaftler eine höhere Anreicherung des Lithium in der sogenannten weißen Substanz. Das ist der Bereich im menschlichen Gehirn, in dem die Nervenbahnen laufen. Der Lithiumgehalt in der benachbarten grauen Substanz war 3-4-fach geringer. Die Lithium-Anreicherung in der weißen Substanz konnte bei den unbehandelten depressiven Pa-

tienten dagegen nicht beobachtet werden. Das weist darauf hin, dass Lithium nicht wie andere Psychopharmaka im Zwischenraum der Nervenzellen wirkt, sondern in den Nervenbahnen selbst.



Gegen Depressionen wird seit Jahrzehnten Lithium eingesetzt (Gemälde von Vincent van Gogh).



Die Gehirnschnitte werden zur Untersuchung in einen Probenwechsler eingespannt.

## Krebszellen effizient bestrahlen

Neuroendokrine Tumore, wie etwa Bauchspeicheldrüsenkrebs, können mit der sogenannten Peptidrezeptor-Radionuklid-Therapie erfolgreich behandelt werden. Ihre Zelloberfläche besitzt zahlreiche Rezeptoren, an die sich bestimmte Peptide bevorzugt anlagern. Für die Behandlung wird deshalb das radioaktive Isotop Lutetium-177 chemisch an entsprechende Peptide gekoppelt und gelangt mit ihnen nach der Injektion in den Tumor. Durch den radioaktiven Zerfall des Lutetium-177 werden die Tumorzellen so stark geschädigt, dass der Zelltod eintritt. Von besonderem Vorteil ist, dass die Strahlung des Lutetium-177 im menschlichen Gewebe nur im Umkreis von maximal zwei Millimetern wirkt. Umliegendes Gewebe bleibt also verschont.

Herstellen lässt sich das radioaktive Lutetium-177 nur an Neutronenquellen mit einem hohen Neutronenfluss, wie ihn der FRM II liefert. Auf dieser Basis haben Wissenschaftler des Instituts für Radiochemie der Technischen Universität München zusammen mit der Firma Isotopes Technologies Garching GmbH (ITG) einen völlig neuen Herstellungsprozess entwickelt. Das Radioisotop Lutetium-177 wird dabei durch Neutronenbestrahlung aus angereichertem Ytterbium-176 gewonnen.

Im Gegensatz zur Nutzung von Lutetium-176 als Ausgangsmaterial vermeidet dieser Prozess die Entstehung des unerwünschten, langlebigen radioaktiven Lutetium-177m als Nebenprodukt, das aufgrund seiner langen Halbwertszeit Probleme in der Behandlung radioaktiver Klinikabfälle verursacht.

In der Kapselbestrahlungsanlage des FRM II dauert eine typische Bestrahlung zur Herstellung von Lutetium-177 14 Tage. Dank des rollierenden Betriebs, einem geschickten Wechsel von Bestrahlungspositionen, kann jedoch jede Woche eine bedarfsgerechte Charge zur Weiterverarbeitung an die ITG GmbH abgegeben werden. Das Isotop Lutetium-177 zerfällt mit einer Halbwertszeit von 6,6 Tagen, deshalb ist die kurze Distanz von wenigen Metern zwischen der ITG GmbH und dem FRM II ausgesprochen vorteilhaft. Kurze Transportwege und eine schnelle Verarbeitung stellen sicher, dass ein möglichst großer Teil der erzeugten Lutetium-177-Aktivität in den Kliniken zur Therapie verfügbar ist.



Hf 176 5.206	Hf 177 18.60		
Lu 175 97.41 $\sigma 8$	Lu 176 2.59 $\sigma 3 + 2070$	Lu 177 160.1 d $\beta^-$	Lu 177 6.647 d $\beta^-$
Yb 174 31.8 $\sigma 68$	Yb 175 4.2 d $\beta$	Yb 176 12.7 $\sigma 3$	Yb 177 1.9 h $\beta$

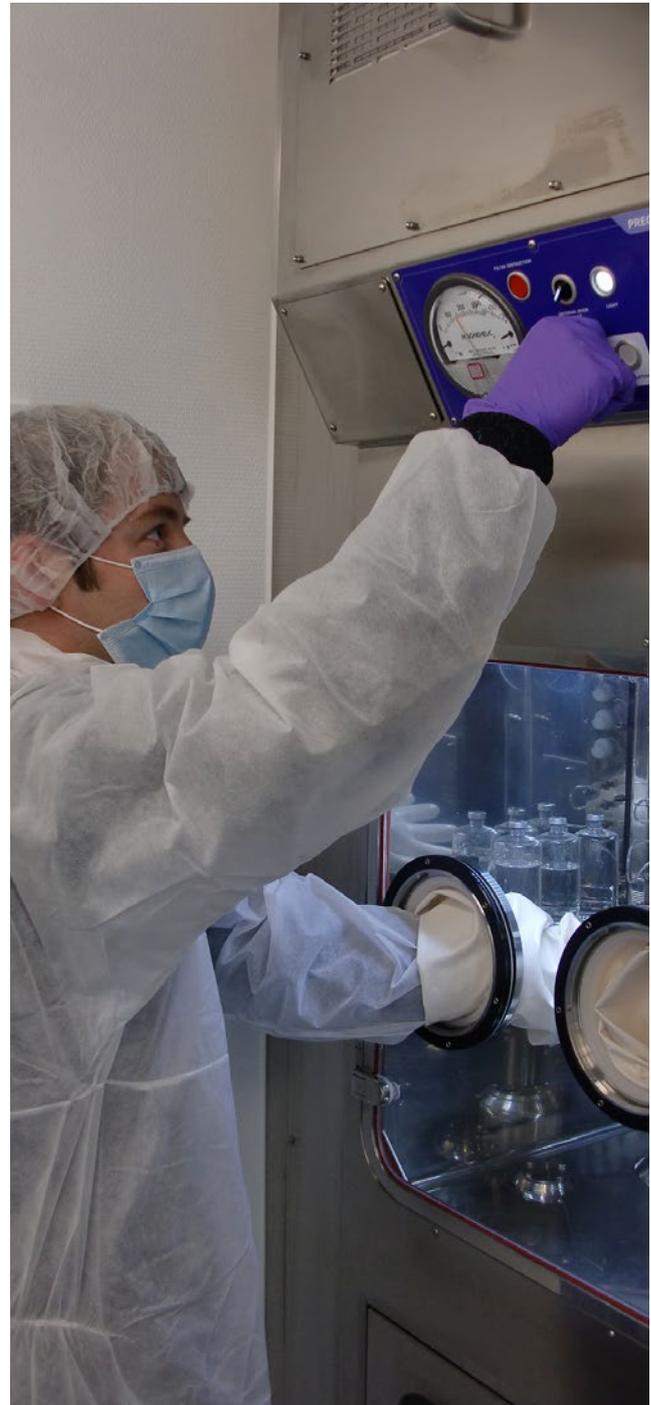
Das Lutetium-177 — links in seiner Verpackung — entsteht durch Neutroneneinfang aus Ytterbium-176.

Aktuell werden wöchentlich und deutschlandweit etwa 50 Patienten mit dem am FRM II produzierten und von der Firma ITG GmbH veredelten Lutetium-177 behandelt.

Die Forschungs-Neutronenquelle wird derzeit so aufgerüstet, dass sie in Zukunft ein weiteres medizinisch wichtiges Radioisotop produzieren kann. Molybdän-99 ist das Mutterisotop von Technetium-99m, das weltweit in über 70 % aller bildgebenden Verfahren eingesetzt wird. Es dient dabei der Tumordiagnose, aber auch zum Beispiel der Überprüfung der Herzfunktion. Weltweit wird Molybdän-99 nur in wenigen Forschungsreaktoren produziert. Da bereits des Öfteren Engpässe aufgetreten sind, werden dringend weitere Produktionskapazitäten gesucht. Der FRM II wird nach Inbetriebnahme der notwendigen neuen Bestrahlungsanlage in der Lage sein, einen wesentlichen Beitrag zum weiterhin steigenden Bedarf an Molybdän-99 zu leisten.

**Partner:**

ITG Isotope Technologies Garching GmbH



Im Reinraum verarbeitet die ITG das Radioisotop.

## Neue Strategien für die künstliche Beatmung

Patienten mit Lungenversagen haben nach mehreren Tagen künstlicher Beatmung häufig eine sehr schlechte Prognose, weil viele Details der Lungenfunktion nicht bekannt sind und daher eine genaue Steuerung der Beatmung kaum möglich ist. Mit Hilfe der Neutronentomographie entstanden Daten, mit denen ein Modell für eine bessere Feinabstimmung der Beatmung gelang.

Anders als die natürliche Atmung erfolgt die künstliche Beatmung mit Überdruck, wobei nicht selten ein Spitzendruck von bis zu 50 Millibar erreicht wird. Schon 40 Millibar Druck sind für das Gewebe einer kranken Lunge viel zu hoch. Das DFG-Schwerpunktprogramm „Protektive Beatmungskonzepte“ entwickelt eine modellbasierte Strategie zur schonenden künstlichen Beatmung, für die Neutronen die nötigen Geometriedaten lieferten. Die feinsten Verzweigungen der Lunge haben Strukturgrößen im unteren Mikrometer-Bereich, als Bild gebendes Verfahren scheint deshalb die Neutronen-Tomographie ideal. Ein vollständiger 3D-Scan am Instrument ANTARES am FRM II benötigt etwa 400 bis 800 Aufnahmen. Selbst der hohe Neutronenfluss des FRM II erfordert immer noch Belichtungszeiten von etwa 20 Sekunden pro Einzelbild.

Im Gerät wurde eine Rattenlunge mit dem zu untersuchenden Beatmungsdruck gefüllt. Die mechanische Abstützung durch den Brustkorb simulierte ein Aluminiumröhrchen. Ändert man den Druck, ändert sich auch die feine Geometrie. Daraus können die Ingenieure die Elastizität des Lungengewebes errechnen. Und sie können sehen, bei welchen Drücken die Grenzen der Elastizität erreicht werden und mit Lungenschäden zu rechnen ist. Die Bildgebung mittels Neutronentomographie war ein sehr wichtiger Schritt, um zu zeigen, dass die Mikrostruktur der Lunge grundsätzlich aufgelöst werden kann. Es hat sich

bei der Bearbeitung der Neutronentomographiebilder jedoch gezeigt, dass für die Darstellung einzelner Alveolen noch eine höhere Auflösung nötig ist, denn gerade auf dieser Ebene entstehen die Schäden bei der künstlichen Beatmung.

### Partner:

Prof. Dr. Josef Guttman

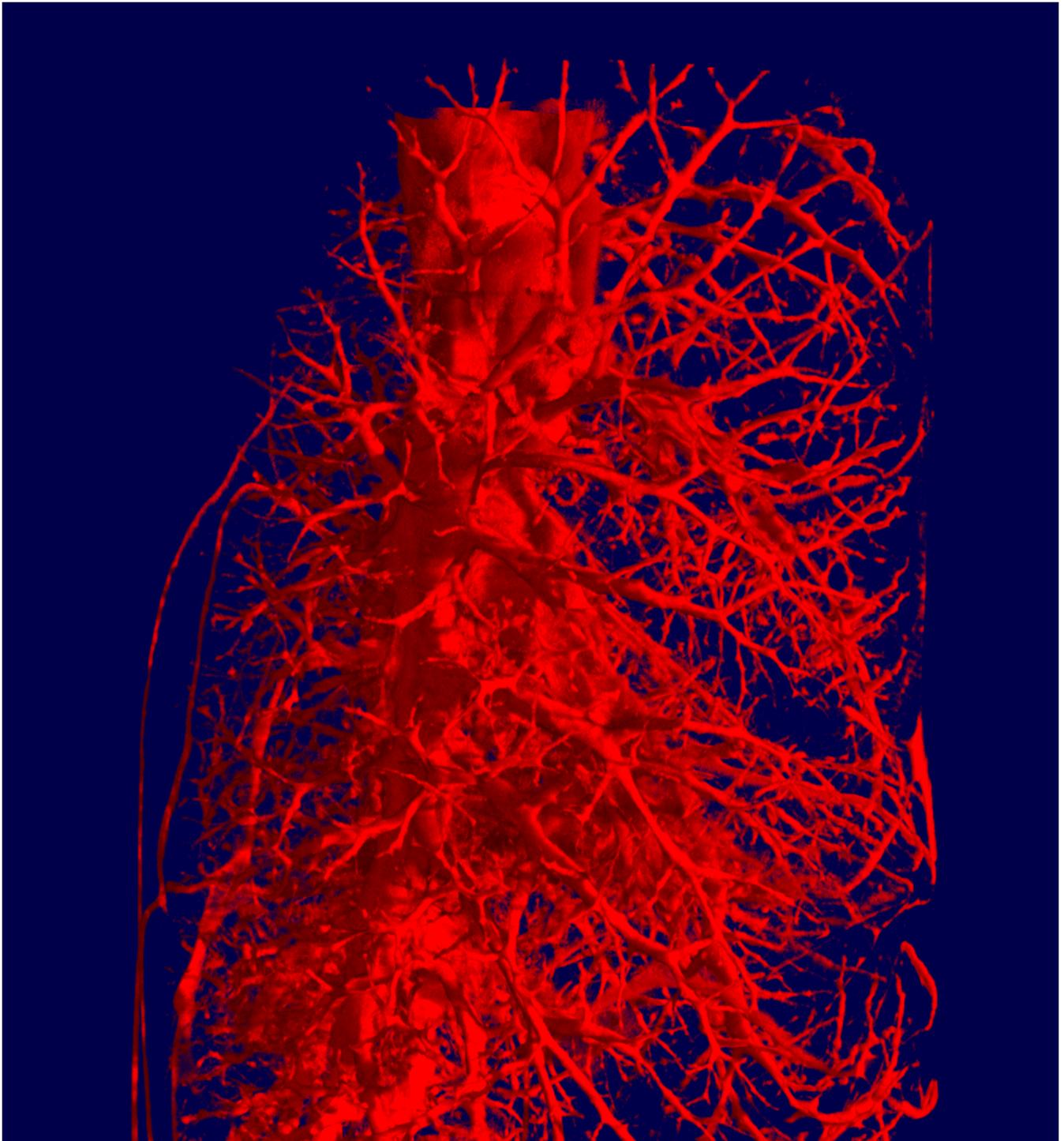
Leiter der Arbeitsgruppe Klinische Atemphysiologie der Freiburger Universitätsklinik

Prof. Dr.-Ing. Wolfgang A. Wall

Lehrstuhl für numerische Mechanik  
Technische Universität München



Bei der künstlichen Beatmung ist die genaue Steuerung entscheidend, ein zu hoher Druck schädigt die Lunge.



Die Tomographie kann selbst die feine Mikrostruktur der Lunge (Auflösung 80  $\mu\text{m}$ ) abbilden.

## Tumorbehandlung mit schnellen Neutronen

Neutronen haben eine sehr hohe biologische Wirksamkeit im Vergleich zu den üblicherweise verwendeten Photonen. Das bedeutet, dass sie auch sogenannte strahlenresistente Tumoren zerstören können. Mit Neutronen des FRM II können jedoch nur oberflächennahe Tumore behandelt werden, weil sie eine sehr geringe Eindringtiefe haben: In 5 cm Tiefe hat die Strahlendosis im Vergleich zur Oberfläche um die Hälfte abgenommen. Besonders effektiv sind Neutronen bei langsam wachsenden Tumoren, dem adenoid-zystischen Tumor der großen Speicheldrüsen, bei sekundären malignen Melanomen der Haut, sowie bei wieder auftretendem Brustkrebs, die alle nicht gut auf konventionelle Bestrahlung ansprechen. Weitere typische Tumorarten, die an der Forschungs-Neutronenquelle bisher behandelt wurden, sind Weichteiltumore und Plattenepithel-Karzinome im Kopf-Hals-Bereich.

Der Neutronenstrahl hat eine maximale Fläche von 30 cm x 19 cm. Die Therapiefelder sind meist kleiner und werden durch einen Lamellenkollimator geformt, der individuell an den Tumor angepasst wird. Der Patient wird auf dem Bestrahlungstisch so positioniert, dass die Tumorregion vom Neutronenstrahl abgedeckt wird. Die Bestrahlungsdauer richtet sich nach der verordneten Strahlendosis; meist sind es maximal drei Minuten pro Feld. Insgesamt sind meist nur vier bis fünf Bestrahlungen pro Feld und Patient nötig.

Akute Nebenwirkungen treten mit etwa derselben Häufigkeit auf wie nach einer konventionellen Bestrahlung und bestehen meist aus Hautentzündungen, die bei entsprechender Nachsorge in wenigen Wochen abheilen.

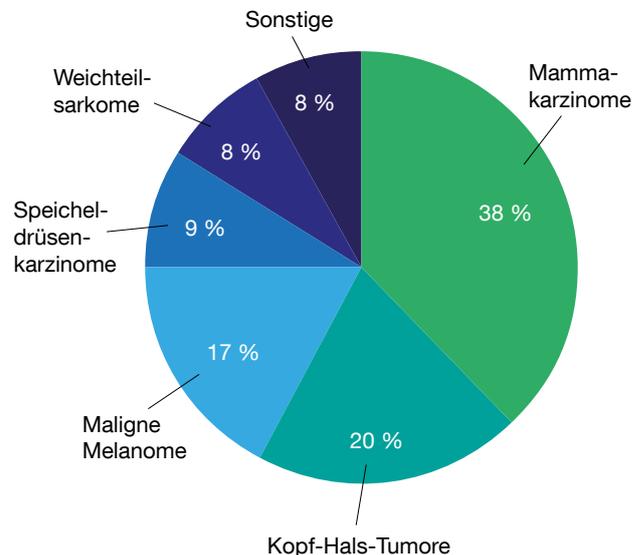
Am FRM I („Atom-Ei“) wurden von 1985 bis ins Jahr 2000 insgesamt 715 Patienten mit Neutronen behandelt. Am FRM II waren es 131 Patienten seit der Inbetriebnahme der Bestrah-

lungseinrichtung im Jahr 2007. Bei richtiger Indikationsstellung stellen die Neutronen eine gute palliative, bei einer kleinen Zahl von Patienten auch sinnvolle kurative Form der Strahlentherapie dar. Die in der Neutronentherapie gewonnenen Erkenntnisse kommen längerfristig auch der Entwicklung neuer, innovativer Bestrahlungsanlagen zur Schwerionentherapie zu Gute. Schwerionen wie Kohlenstoff lassen sich bezüglich der hohen biologischen Wirkung bei der Vernichtung von Tumor- bzw. Krebszellen mit Neutronen vergleichen.

### Partner:

Prof. Dr. Michael Molls  
Klinikum rechts der Isar

Dr. Waltraud Reuschel  
Klinikum rechts der Isar



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



Die Tumorbestrahlungsanlage am FRM II mit der Gesichtsmaske für eine genaue Positionierung des Patienten.



**Dr. Waltraud Reuschel, behandelnde Ärztin am Klinikum rechts der Isar und am FRM II**

*„Neutronenstrahlen wirken oft auch dann noch, wenn der Tumor auf konventionelle Methoden nicht mehr anspricht. In vielen Fällen haben die Patienten schon Metastasen, entscheidend für den Patienten ist jedoch die Lebensqualität.“*

# Impressum

---

## Herausgeber

---

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

Siemens-Pressebild:  
Seite 26

Michael E. Hauk:  
Seite 31 oben

C.Schmid, Helmholtz-Zentrum Geesthacht:  
Seite 33

## Redaktion

---

Christine Kortenbruck, FRM II  
Andrea Voit, FRM II

Helmholtz-Zentrum Geesthacht:  
Seite 40

Flughafen München GmbH:  
Seite 37

## Layout und Satz

---

Ramona Bucher, FRM II

Miguel Barousse Moreno:  
Seite 50

## Bildnachweis

---

Wenzel Schürmann, TUM:  
Seite 8, 9, 10, 11, 12, 13, 21, 28, 29 oben, 53, 54,  
56, 57, 61, 63, 69 oben

Bin im Garten:  
Seite 38

Alfred Clouth Lackfabrik GmbH & Co. KG:  
Seite 39

Andreas Heddergott / Astrid Eckert, TUM:  
Seite 14, 15, 17, 19, 24, 41, 42, 43

Vincent van Gogh:  
Seite 62

Volker Lannert, DAAD:  
Seite 20, 23, 32, 35, 49, 51

vintagelove67, wikipedia:  
Seite 66

FRM II/ TUM:  
Titelbild, Seite 18, 27, 30, 36, 44, 46, 52, 55 oben,  
58, 59, 68

Lehrstuhl für numerische Mechanik, TUM:  
Seite 67

ITG Isotope Technologies Garching GmbH:  
Seite 64, 65

Andere Bilder: privat



