

Eigenschaften von Materie, Materialien und Werkstoffen lassen sich durch eine Vielzahl von physikalischen Methoden bestimmen. Oft reicht es aus, makroskopische Kenngrößen wie beispielsweise Härte und Dichte zu ermitteln. Will man hingegen neuartige Materialien gezielt herstellen, ist

elektromagnetische Strahlung; aber auch Teilchen, wie Elektronen oder Neutronen können diese für uns nicht direkt beobachtbaren Vorgänge im Inneren der Materie entschlüsseln. Insbesondere Neutronen können wegen der fehlenden elektrischen Ladung bis zu mehrere Zentimeter tief in Flüss-

Seit 1998 ist eine externe Göttinger Arbeitsgruppe permanent in Garching, die für den Aufbau und Betrieb des Instrumentes verantwortlich ist. Außer für unsere eigenen Forschungen steht das Gerät auch allen anderen interessierten Forschergruppen aus dem In- und Ausland für Experimente zur Verfügung.

In diesem Beitrag möchten wir einen kurzen Einblick in die faszinierende Welt der Neutronenstreuung und in einen Teil unserer Forschung geben. Die beschriebenen Forschungs- und Entwicklungsergebnisse konnten nur durch die engagierte Mitarbeit vieler Personen erreicht werden. Neben den Mitarbeitern der Werkstätten sind es Dr. Peter Link und Joachim Neumann (beide bis 2002), Dr. Klaudia Hradil und Harald Schneider (seit 2002) in unserer Außenstelle am FRM-II und im Rahmen der Entmischungsuntersuchungen innerhalb der Göttinger Arbeitsgruppe Dr. Dirk Caspary, Dr. Patrick Elter, Dr. Holger Gibhardt und Arne Ringe.

### Warum gerade Neutronen?

Die Neutronenstreuung ist eine der leistungsfähigsten Methoden der modernen Festkörperforschung. Einzigartig ist ihre Fähigkeit, Informationen über räumliche und zeitliche Prozesse auf atomarer Ebene zu gewinnen. Selbst die Bewegung einzelner Atome kann aus der Ablenkung von Neutronenstrahlen rekonstruiert werden. Ebenso wie der zurückprallende Ball beim Tennis viel über die Spannung des Netzes aussagt, können wir im mikroskopischen Maßstab aus der Geschwindigkeitsänderung (genauer: aus Energie- und Impulsänderung) der Neutronen beim Aufprall auf einen Festkörper sehr viel über den Zusammenhalt eines gesamten Kristallgitters lernen (Abbildung 1). Mehr noch – Neutronen sind nicht nur winzige Teilchen, die im Rahmen der Quantenmechanik auch als Materiewelle beschrieben

# Neutronen – Spione im Inneren der Materie

Messtechnik mit dem Göttinger  
Dreiachsenspektrometer PUMA

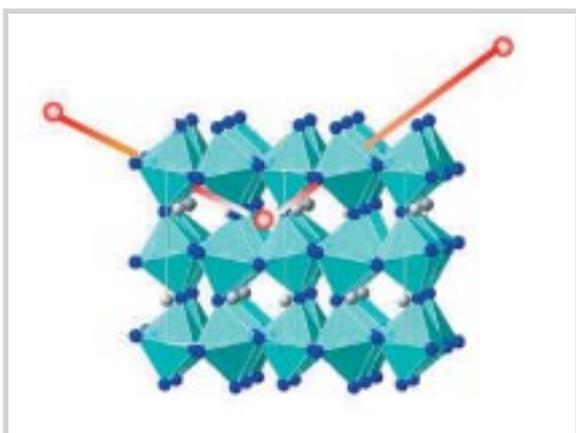
**Götz Eckold, Klaudia Hradil**

einerseits die Kenntnis des inneren Aufbaus, der Anordnung der atomaren Bausteine notwendig. Darüber hinaus spielen aber andererseits die Dynamik und die Kräfte, die zwischen diesen Bausteinen herrschen, eine entscheidende Rolle. Ähnlich wie bei einer Spiralfeder, deren Stärke man erst messen kann, wenn man sie zusammendrückt oder auseinanderzieht, lassen sich auch die interatomaren Kräfte nur dadurch bestimmen, dass man sie beansprucht und beobachtet, wie die Atome darauf reagieren. Häufig verwendet man dazu Licht, also

sigkeiten oder feste Körper eindringen und gewissermaßen die atomaren Vorgänge für uns ausspionieren.

Forschung mit Neutronen unterscheidet sich allerdings grundsätzlich von Laborexperimenten. Es ist Großgeräteforschung, bei der man sich in einem Begutachtungsverfahren um Messzeit an nationalen oder internationalen Neutronenquellen bewerben muss. In der Arbeitsgruppe »Physikalische Chemie fester Körper« am Institut für Physikalische Chemie der Universität Göttingen ist die Neutronenstreuung eine der wichtigsten Methoden. Hier wurde in den vergangenen Jahren ein eigenes Spektrometer – das Dreiachsenspektrometer PUMA – entwickelt, das an der neuen Forschungsneutronenquelle FRM-II in Garching aufgebaut wurde und nach der Einweihung im Dezember 2004 gerade seinen Betrieb aufnimmt. In den Jahren 1998 bis 2004 stellte das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 2,7 Millionen Euro bereit, für 2004 bis 2007 wurde nochmals eine Summe von 700.000 Euro bewilligt.

Abbildung 1:  
Ein Neutron testet  
interatomare  
Wechselwirkungen



werden, Neutronen sind gleichzeitig auch kleine Magnete, die magnetische Eigenschaften von Stoffen erkunden können. So sammeln diese kleinen Sonden beim Durchgang durch Materie unterschiedlichste Informationen auf und geben sie uns gewissermaßen verschlüsselt wieder, wenn wir danach fragen, wie viele Neutronen in einer bestimmten Richtung abgelenkt werden und dabei eine bestimmte Geschwindigkeits- oder Energieänderung erfahren haben.

Die ersten grundlegenden Neutronenstreu-Untersuchungen wurden von Clifford Glenwood Shull und Bertram Nelville Brockhouse zu Beginn der 1950er Jahre ausgeführt. Dafür erhielten sie gemeinsam 1994 den Nobelpreis für Physik. Im Mittelpunkt dieser ersten Experimente standen einerseits Strukturuntersuchungen an magnetisch geordneten Kristallen wie etwa Manganoxid ( $MnO$ ) und andererseits die Bestimmung von Schwingungen einfacher Kristallgitter. Die Neutronenstrahlintensität war bei diesen bahnbrechenden Experimenten allerdings noch relativ gering und der Nachweis der Streueffekte entsprechend schwierig.

Intensive Neutronenquellen sind in den letzten fünfzig Jahren an vielen Standorten in aller Welt entstanden. Gerade kürzlich ist als derzeit modernste Einrichtung die nach dem Pionier der Neutronenstreuung in Deutschland benannte Forschungsneutronenquelle Heinz Maier-Leibnitz (FRM-II) in Garching in Betrieb genommen worden. Hier arbeiten Wissenschaftler unterschiedlicher Disziplinen – Chemie, Physik, Geo- und Materialwissenschaften, Biologie und Medizin bis hin zur anwendungsnahen Industrie-



forschung – zusammen, um exzellente Experimentiermöglichkeiten für Nutzergruppen aus aller Welt zu entwickeln. Auch das Institut für Physikalische Chemie der Universität Göttingen ist an der Instrumentierung beteiligt und hat in den vergangenen Jahren mit dem Dreiachsenspektrometer PUMA eines der weltweit leistungsfähigsten Geräte seiner Art gebaut. Dementsprechend bildet auch diese Art der Großgeräteforschung einen Forschungsschwerpunkt in der Abteilung Physikalische Chemie fester Körper.

## Das Göttinger Dreiachsenspektrometer PUMA – Messtechnik mit vielen Anwendungen

Neutronenstreuung ist im eigentlichen Sinne nicht eine einzige Methode, vielmehr gibt es eine Vielzahl unterschiedlicher Techniken, mit denen man heute verschiedene Fragestellungen bearbeiten kann. Die Dreiachsenspektroskopie ist dabei eine besonders flexible Methode. Ihr Prinzip ist in der Graphik (Abbildung 2) dargestellt. Drei unabhängig voneinander bewegliche Drehachsen – die Monochromator-, Proben- und Analysatorachse –, an denen Neutronen nacheinander abgelenkt werden, geben dieser Messmethode ihren Namen.

Eine Neutronenquelle liefert üblicherweise Neutronen mit einer breiten Geschwindigkeits- oder Energieverteilung. Für ein Neutronenstreuexperiment benötigt man jedoch in der Regel einen Neutronenstrahl mit einer bestimmten, einstellbaren Energie. Diesen beschafft man sich beim Dreiachsenspektrometer dadurch, dass man den Strahl zunächst auf einen Monochromator-Einkristall fallen lässt, der nur Neutronen einer bestimmten Energie reflektiert. Diese ist umso kleiner, je größer der Reflexionswinkel gewählt wird. Die nun monochromatischen Neutronen treffen auf eine Probe des zu untersuchenden Materials und werden dort ähnlich wie der Tennisball beim Auftreffen auf das Netz gestreut. Die abgelenkten Neutronen werden anschließend in Abhängigkeit vom



Streuwinkel in einem Detektor nachgewiesen, nachdem sie nochmals durch Reflexion an einem Analysatorkristall nach Energien sortiert wurden. Es werden also nur diejenigen Neutronen gezählt, die unter einem bestimmten Winkel die Probe verlassen und dabei ihre Energie in wohldefinierter Weise geändert haben. Diese unelastische Streuung wird durch Anregungen innerhalb der Probe hervorgerufen, die charakteristisch für die interatomaren Kräfte sind.

Durch Drehung des gesamten Spektrometers um die drei Achsen gelingt es, nacheinander Streuintensitäten zu ermitteln, die Rückschlüsse auf dynamische Eigenschaften der Probe erlauben. Zusätzlich kann man jede Probe selbst noch einmal in drei Raumrichtungen orientieren, um so auch richtungsabhängige Eigenschaften zu bestimmen. Eine Vielzahl weiterer Einstellmöglichkeiten vervollständigt die Ausrüstung eines modernen Dreiachsen-spektrometers – eines äußerst komplexen Großgerätes für die Erforschung kondensierter Materie.

Mehr als 50 Bewegungseinheiten sind im Göttinger Dreiachsen-spektrometer PUMA (Abbildung 3) realisiert, die alle vollautomatisch gesteuert werden. Die Hauptbaugruppen, wie Probenstisch, Analysator und Detektor, bewegen sich

dabei nahezu reibungsfrei auf Luftkissen. Zum Schutz der Experimentatoren gegen die radioaktive Strahlung ist der Monochromator von einer massiven Abschirmung mit nahezu 2,5 Meter Durchmesser und mehr als 60 Tonnen Gewicht umgeben. Der Probenort ist so dimensioniert, dass Untersuchungen auch bei komplexen äußeren Bedingungen, wie zum Beispiel bei hohen oder tiefen Temperaturen, bei hohen Drücken oder elektrischen und magnetischen Feldern, möglich sind.

Trotz der beträchtlichen Abmessungen des Spektrometers müssen sämtliche Drehbewegungen so genau kontrolliert werden, dass die Winkeleinstellungen auf wenige Hundertstel Grad garantiert sind. Dank der engagierten Mitwirkung der Mitarbeiter unserer Außenstelle in Garching und der Werkstätten unseres Instituts konnten diese ehrgeizigen Vorgaben vollauf erfüllt werden. Weitere Zusatzeinrichtungen, wie etwa die Möglichkeit zur Ausrichtung der mit den Neutronen verknüpften Elementarmagnete (Polarisation) oder die gleichzeitige Verwendung nicht eines einzelnen sondern einer ganzen Reihe von parallel arbeitenden Analysatoren, machen das Spektrometer zu einem weltweit einzigartigen Instrument. Diese Besonderheiten begründen auch den Namen PUMA

als Abkürzung für »Dreiachsen-spektrometer mit Polarisationsanalyse und Multi-Analysator«. Öfen, Kryostaten (Kühlvorrichtungen), Druckzellen, Magnete und andere Probenumgebung erlauben es, Experimente unter unterschiedlichsten Bedingungen auszuführen und somit Materialeigenschaften auf atomarer Ebene zu studieren.

### Ein Anwendungsbeispiel – Kinetik von Festkörperprozessen

Was kann man mit dieser Technik untersuchen? Es wäre sicher vermessen, an dieser Stelle auch nur einen annähernd vollständigen Überblick über die Anwendungsmöglichkeiten der Dreiachsen-spektroskopie geben zu wollen. Zu breit sind die Themenbereiche gefächert. Dynamische Instabilitäten von Kristallen gehören dazu, bei denen das Kristallgitter zunächst in Schwingungen gerät, deren Amplitude stetig anwächst, so dass schließlich eine neue Struktur mit neuen Eigenschaften entsteht. Auch die Ursachen vieler technisch wichtiger Materialeigenschaften lassen sich studieren, wie Ferroelektrizität, die bei Sensoren oder Speicherzellen eine große Rolle spielt, oder negative thermische Ausdehnung, also die ungewöhnliche aber äußerst attraktive Eigenschaft eines Materials, sich bei Temperaturerhöhung zusammenzuziehen. Die in den achtziger Jahren des letzten Jahrhunderts entdeckten Hochtemperatur-Supraleiter besitzen die Fähigkeit, elektrischen Strom verlustfrei zu transportieren unter anderem auf Grund spezieller magnetischer dynamischer Eigenschaften, die ausschließlich mit der Neutronen-Dreiachsen-spektroskopie nachgewiesen werden können.

Ein noch recht neues Anwendungsgebiet ist die Untersuchung von Festkörpern und Materialien, die sich unter äußerer Belastung zeitlich verändern. Mechanische Beanspruchungen durch Druck

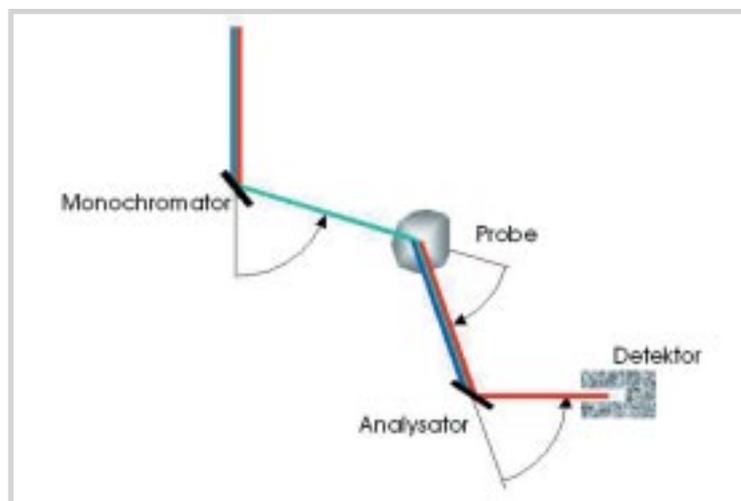
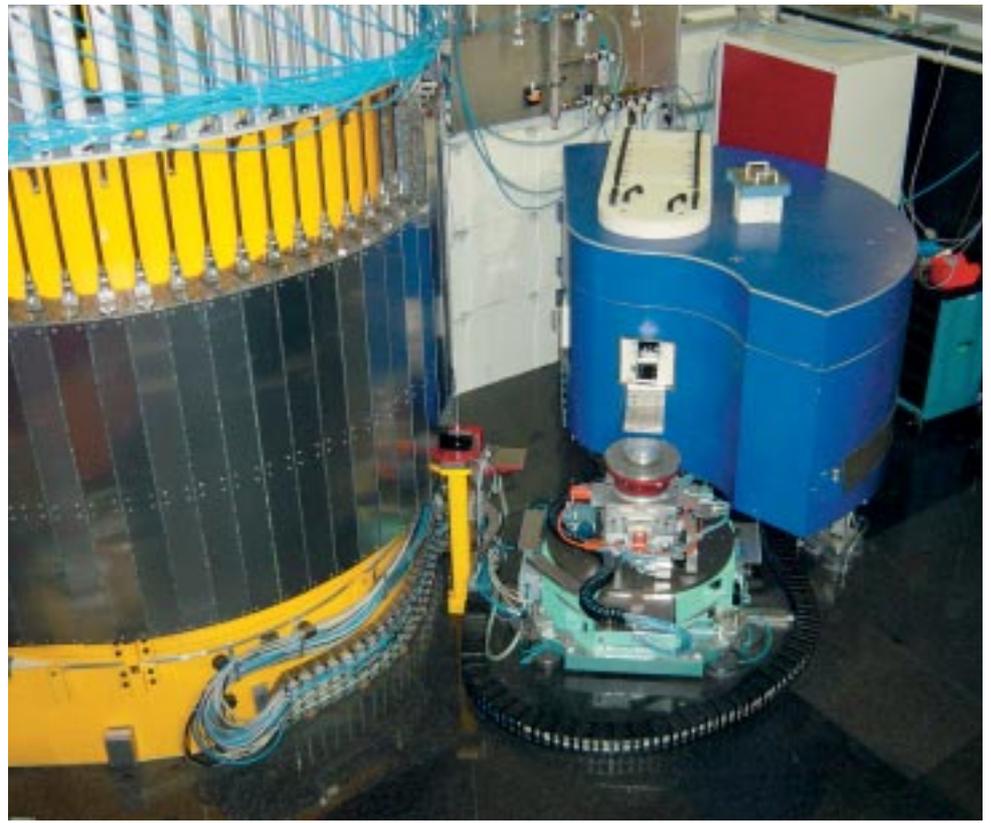


Abbildung 2:  
Die drei Achsen des  
Spektrometers

Abbildungen:  
Götz Eckold,  
Klaudia Hradil

oder Zug können die Materialeigenschaften ebenso beeinflussen wie Temperaturwechsel, die Anwendung von elektrischen Spannungen oder magnetischen Feldern. Wie erstmals von unserer Arbeitsgruppe gezeigt werden konnte, ist es möglich, die Veränderung von atomaren Wechselwirkungen im Laufe von Festkörperreaktionen zeitabhängig zu bestimmen und somit Informationen über den Mechanismus und den Verlauf der Umwandlungen zu gewinnen. Dazu untersucht man die Schwingungen des Kristallgitters – die so genannten Phononen, die sämtliche Wechselwirkungskräfte im Inneren eines Festkörpers widerspiegeln. Eine spezielle Messtechnik, die Stroboskopie, erlaubt es dabei, Veränderungen auf einer Zeitskala von Millisekunden nachzuweisen, selbst wenn übliche Messzeiten zum Nachweis einer einzelnen Gitterschwingung im Bereich einiger Minuten liegen.

Ein Beispiel für derartige Untersuchungen ist die Aufklärung von Entmischungsreaktionen in Ionenkristallen vom Typ der Silber-Alkalihalogenide, bei denen sich aus einer homogenen Phase nach Temperaturniedrigung zwei separate Phasen unterschiedlicher Konzentrationen bilden. Lange Zeit ging man davon aus, dass derartige Prozesse verhältnismäßig langsam ablaufen, da die Veränderungen der Kristallstruktur, charakterisiert durch Beugungsdiagramme, Tage, Wochen oder gar Monate benötigen. Erst kürzlich konnten wir aber durch zeitaufgelöste Neutronenspektroskopie nachweisen, dass die chemische Entmischung, also die Veränderung der Bindungsverhältnisse aufgrund von atomaren Umordnungsvorgängen, in Wirklichkeit viel schneller, das heißt innerhalb weniger Sekunden erfolgt, ohne dass dies von außen sichtbar ist. Offensichtlich lagern sich die Ionen innerhalb eines nahezu starren Kristallgitters um, wobei



sich die Atomabstände nicht ändern, wohl aber die Wechselwirkungskräfte. Ein derartig entmischter Kristall besteht demnach aus Bereichen, in denen eine Teilchensorte angereichert ist. Die Größe dieser Domänen hängt in charakteristischer Weise von Entmischungstemperatur und -dauer ab und bestimmt die Eigenschaften der Kristalle. Die Neutronenstreuung hat einzigartige Informationen darüber geliefert, auf welche Weise und wie schnell sich die Ionen umordnen und welche Domänen dabei gebildet werden. Interessant ist, dass gerade bei diesen Untersuchungen die Kombination mehrerer Neutronenstreuungstechniken, wie Diffraktion (Beugung von Wellen), Kleinwinkelstreuung und letztendlich die Dreiachsenspektroskopie die Aufklärung der atomaren Vorgänge ermöglichte.

Ist der mikroskopische Mechanismus solcher Prozesse erst einmal bekannt, so kann man dieses Wissen ausnutzen, um auf wohldefinierte Weise selbstorganisierte

Nanostrukturen zu bilden. Derartige Strukturen mit charakteristischen Größen zwischen einem Millionstel und einem Tausendstel Millimeter stehen heute im Zentrum der aktuellen Festkörperforschung. Wir wissen aufgrund unserer Experimente, dass ein Mischkristall aus Silberchlorid und Natriumchlorid räumlich periodische Konzentrationsmuster ausbildet, wenn er bei vorgegebener Temperatur eine bestimmte Zeit lang entmischt wurde. Man spricht von spinodaler Entmischung. Dabei liegen die Periodenlängen je nach Entmischungsdauer im Bereich zwischen einigen zehn Nanometern und einigen 100 Nanometern. Wartet man lange genug, so werden die Muster immer größer, bis im Gleichgewicht schließlich makroskopische Körner nebeneinander vorliegen. Da das Natriumsalz sehr viel leichter im Wasser löslich ist als das Silbersalz, kann man es aus der Oberfläche eines Einkristalls auswaschen (ätzen) und so den Entmischungsprozess gezielt unter-

Abbildung 3:  
Das Göttinger Dreiachsenspektrometer PUMA an der Forschungsneutronenquelle FRM-II in Garching

brechen. Auf diese Weise erhält man ein regelmäßiges Relief, das man mit einem Atomkraft-Mikroskop direkt sichtbar machen kann. Abbildung 4 zeigt ein typisches Beispiel derartiger Entmischungsstrukturen. Da wir die Kinetik der Phasentrennung inzwischen sehr gut kennen, können wir die Periodizität des Oberflächenmusters nach unterschiedlicher Vorbehandlung recht gut vorhersagen.

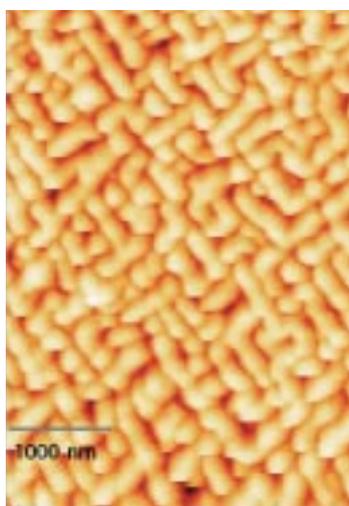


Abbildung 4:  
Nanoskalige Oberflächenstruktur eines Silber-Natriumchlorid Einkristalls nach Entmischung

### ... und die Zukunft?

Es ist das Wissen um die atomaren Vorgänge im Inneren von Feststoffen, das es uns ermöglicht, deren Eigenschaften zu verstehen und auch nach unseren Wünschen zu beeinflussen. Dabei werden zunehmend Nicht-Gleichgewichtssysteme interessant, die vorteilhafte transiente Eigenschaften aufweisen. Es reicht dann nicht mehr aus, den Anfangs- und den Endzustand einer Umwandlung zu beschreiben; vielmehr werden die Mechanismen erst durch die durchlaufenen Zwischenzustände charakterisiert. Die Neutronenstreuung ist eine hervorragend geeignete Methode dafür, einen tiefen Einblick in das atomare Geschehen zu gewinnen. Als Spione durchdringen Neutronen die Materie und liefern uns dabei Informationen, die sonst verborgen geblieben wären. ◀

Neutrons are a powerful tool for the investigation of properties of matter. Due to their ability to enter deeply into materials, they provide detailed information about the microscopic behaviour of atoms in solids or liquids. Structure and dynamics can be studied by a variety of neutron scattering techniques, among which three axes spectroscopy is one of the most flexible. The Institute of Physical Chemistry at Göttingen University is not only using this technique but is also engaged in the instrumentation. The three axes spectrometer PUMA, one of the most powerful instruments of its type worldwide, was developed in recent years in Göttingen and is currently starting operation at the new neutron source FRM-II in Garching. A good number of special features make this instrument extremely versatile and allow

for multiple different applications. Even the kinetics of solid state reactions can be studied on a microscopic level thus making it possible to determine the change of interatomic interactions or chemical bonding in real-time. Of particular interest are demixing reactions in ionic crystals which can be characterised most directly by the change of lattice vibrations. The detailed knowledge of the underlying mechanism of these processes was used recently to produce well defined nanoscaled surface structures on single crystals. Self-assembled patterns are formed with periodicities that depend on the kinetics of demixing as determined by neutron scattering. Hence, neutrons are used as spies to detect the internal processes in solids and help to tailor materials with new and attractive properties.



*Prof. Dr. Götz Eckold, Jahrgang 1951, studierte Physik an der Universität Göttingen und wurde am Institut für Physikalische Chemie im Jahr 1975 promoviert. Von 1977 bis 1996 arbeitete er an der Rheinisch-Westfälischen Technischen Universität Aachen, an der er sich 1992 habilitierte, und am Forschungszentrum Jülich. 1996 wurde er an das Institut für Physikalische Chemie an der Georg-August-Universität Göttingen berufen. Prof. Eckold war Mitglied mehrerer wissenschaftlicher Beratergremien, darunter drei Jahre lang am Institut Laue-Langevin in Grenoble (Frankreich). Seit 2001 ist er Vorsitzender des Instrumentierungsausschusses der Forschungsneutronenquelle FRM-II in Garching und seit 2005 Mitglied und stellvertretender Vorsitzender des Komitees Forschung mit Neutronen. Die Göttinger Fakultät für Chemie leitete Prof. Eckold von 2003 bis 2005 als Dekan. Seine Forschungsschwerpunkte sind unter anderem die inelastische Neutronenstreuung, Gitterdynamik und Fehlordnung von Festkörpern sowie die Festkörperkinetik.*



*Dr. Klaudia Hradil, Jahrgang 1964, studierte Kristallographie und Mineralogie an der Ludwig-Maximilians-Universität München und schloss ihr Diplom-Studium 1989 ab. Am dortigen Institut für Kristallographie wurde sie 1995 promoviert. Erste Arbeitserfahrungen hatte Dr. Hradil zuvor in den Forschungslabors von Siemens in München-Neuperlach gesammelt. Nach ihrer Promotion war sie zuerst als Postdoktorandin in München, anschließend am Hahn-Meitner-Institut in Berlin und zuletzt als Assistentin an der Universität Würzburg tätig. Seit November 2002 ist Dr. Hradil Mitarbeiterin des Instituts für Physikalische Chemie der Universität Göttingen. An der Forschungsneutronenquelle FRM-II in Garching betreut sie den Betrieb des Göttinger Dreiachsenspektrometers PUMA.*

## GAUSS – Georg August University School of Science

(red.) Mit der Georg August University School of Science (GAUSS) wird die Doktorandenausbildung der Georgia Augusta in der Mathematik und den Naturwissenschaften grundlegend neu strukturiert. Ziel der Graduiertenschule ist es, die Betreuung, die Forschungs- und die Lernbedingungen für Doktoranden zu optimieren und die Entwicklung exzellenter Nachwuchswissenschaftler nachhaltig zu fördern. GAUSS ist eine von drei Graduiertenschulen an der Universität Göttingen, die die Betreuung von Doktoranden in strukturierten Programmen in allen Disziplinen ermöglichen werden.

GAUSS wurde im Sommer 2005 gegründet und als einer von sechs Wettbewerbsbeiträgen der Universität Göttingen im Rahmen der Exzellenzinitiative des Bundes und der Länder in der Förderlinie 1 eingereicht. Beteiligt sind die Fakultäten Mathematik, Physik, Chemie, Biologie sowie Geowissenschaften/Geographie. Die Fakultäten für Medizin, Agrarwissenschaften sowie Forstwissenschaften und Waldökologie sind assoziierte Mitglieder mit eigenen Doktorandenprogrammen, die dem Standard von GAUSS entsprechen. Die in Göttingen ansässigen Max-Planck-Institute für biophysikalische Chemie, für experimentelle Medizin und für Dynamik und Selbstorganisation sowie das MPI für Sonnensystemforschung in Katlenburg-Lindau, das Deutsche Primatenzentrum, das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt und die Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL) in Braunschweig sind ebenfalls in die School of Science eingebunden. Mit diesem Netzwerk an Forschungseinrichtungen kann den Nachwuchswissenschaftlern ein hochkarätiges Umfeld gebo-

ten werden. In die Graduiertenschule sollen pro Jahr rund 450 bis 500 Doktoranden neu aufgenommen und laufend rund 1.500 Promotionsprojekte betreut werden. Etwa 20 Prozent aller an der Universität Göttingen eingereichten Dissertationen kommen zur Zeit aus den naturwissenschaftlichen Disziplinen.

rem Doktorvater und einer mehrköpfigen Kommission betreut und beraten.

Die neue Göttinger Graduiertenschule kann bei ihrer Arbeit auf Erfahrungen in mehreren DFG-Graduiertenkollegs, drei International Max Planck Research Schools, dem Marie-Curie-Förderprogramm und internationalen Pro-

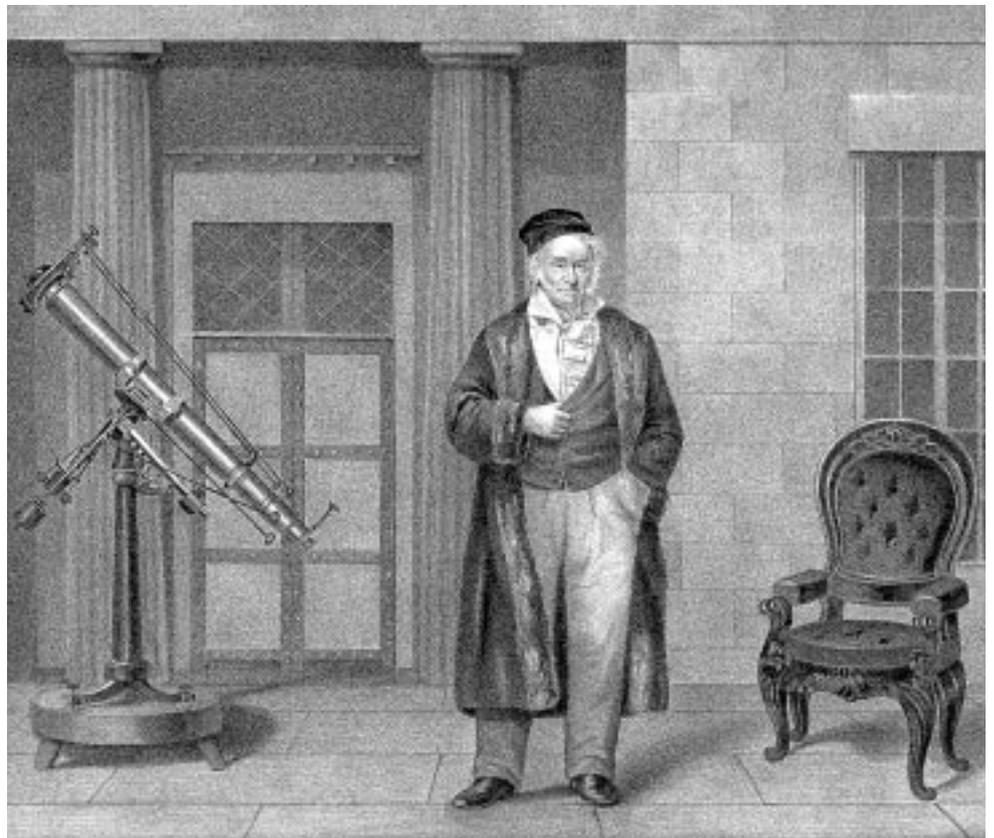


Illustration: Carl Friedrich Gauß auf der Terrasse der Göttinger Sternwarte

In GAUSS werden die besten Bewerber in international offenen Verfahren ausgewählt. Die Graduiertenschule koordiniert Lehrangebote für Doktoranden, sorgt für die Vermittlung von Schlüsselqualifikationen und unterstützt die Kandidaten in fachlichen und persönlichen Belangen. Die Doktoranden werden in ihrem individuellen Promotionsprojekt von ih-

motionsstudiengängen zurückgreifen. Vor allem die internationalen Promotionsprogramme Molekulare Biologie und Neurowissenschaften haben für die Ausgestaltung der GAUSS-Graduiertenschule Modellcharakter. Sie wurden vom Auswärtigen Amt für die besondere Qualität in der Betreuung ausländischer Studierender im vergangenen Jahr ausgezeichnet.