

Bayerisches Geoinstitut

Hochdruckforschung mit Neutronen – ein neues Fenster zum Erdinnern



Abb. 1: Alles Wasser an der Erdoberfläche stammt letztlich aus vulkanischen Gasen. Im Bild eine Eruption des Stromboli nördlich von Sizilien.

Bislang wissen wir noch wenig über das Verhalten von Wasser und Kohlenstoff im Erdinnern. Hochdruckexperimente mit Neutronen könnten hier entscheidende neue Erkenntnisse liefern, sie waren aber bisher aufgrund von technischen Schwierigkeiten nur in sehr begrenztem Umfang möglich. Das Bayerische Geoinstitut in Bayreuth baut gegenwärtig eine neuartige Apparatur an der Forschungsneutronenquelle FRM II in Garching, die Experimente mit Neutronen unter bisher nicht zugänglichen Druck- und Temperaturbedingungen ermöglichen wird. Diese Arbeiten werden, wie alle Aktivitäten des Instituts, von der Kommission für geowissenschaftliche Hochdruckforschung der Akademie wissenschaftlich begleitet.

VON HANS KEPPLER UND NICO WALTE

Die Erde – der Planet des Wassers

Die Erde ist der einzige Planet im Sonnensystem, dessen Oberfläche zu einem großen Teil von Ozeanen aus Wasser bedeckt ist. Die Existenz von flüssigem Wasser ist wahrscheinlich eine Voraussetzung für die Entstehung von Leben. Woher das Wasser auf der Erde kommt und seit wann es Ozeane gibt, ist daher eine ganz entscheidende Frage in der Erdgeschichte. Lange gab es hier zwei konkurrierende Vorstellungen: Das Wasser könnte entweder aus der Entgasung des Erdinnern stammen oder erst nach der Entstehung der Erde durch wasserreiche Objekte wie Kometen angeliefert worden sein. Durch moderne Isotopen-geochemische Untersuchungen konnte diese Frage mittlerweile mit großer Sicherheit geklärt werden: Das Verhältnis von Deuterium zu Wasserstoff auf der Erde ist grundsätzlich verschieden von dem in den meisten Kometen. Dagegen entspricht dieses Verhältnis sehr genau dem in chondritischen Meteoriten, die wahrscheinlich Überbleibsel sind von dem Material, aus dem sich die Erde gebildet hat. Das Wasser war daher wohl bereits seit der Entstehung der Erde auf unserem Planeten vorhanden und ist durch vulkanische Gase, die zum großen Teil aus Wasserdampf bestehen, an die Erdoberfläche transportiert worden (Abb. 1).

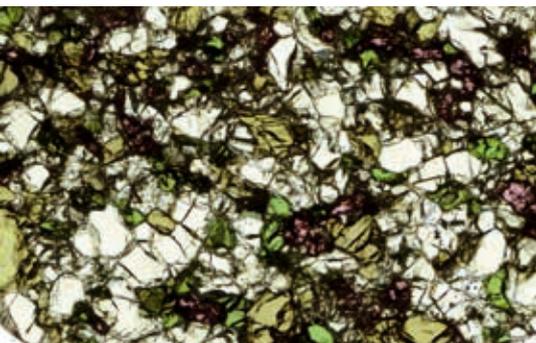


Abb. 2: Ein Bruchstück des Erdmantels von einem Vulkan in Pali-Aike, Patagonien. Die einzelnen Mineralkörner sind etwa 1 mm groß, das helle, fast farblose Mineral ist Olivin ($(\text{Mg,Fe})_2\text{SiO}_4$).

Lange glaubte man, dass die Entgasung des Erdinnern eine Einbahnstraße sei: Wasser, das einmal an die Oberfläche gelangt ist, bleibe dort, und da der Entgasungsprozess der Erde bereits sehr lange andauert, sei das Erdinnere praktisch „trocken“. Dies scheint auf den ersten Blick auch der Fall zu sein. Explosive Vulkaneruptionen bringen häufig Bruchstücke des Erdmantels an die Erdoberfläche. Solche – oft auffallend grüne – Bruchstücke kann man auch leicht in den Basaltsteinbrüchen der Oberpfalz oder der Eifel finden (Abb. 2). Sie bestehen normalerweise aus



Abb. 3: Transport der 6-Stempel-Hochdruckpresse zur Neutronenleiterhalle Ost am Heinz Maier-Leibnitz Zentrum für Neutronenforschung in Garching.

Mineralen wie Olivin ($(\text{Mg,Fe})_2\text{SiO}_4$), die in ihrer chemischen Formel kein Wasser enthalten – sie sind also nominal wasserfrei. Bereits vor über 50 Jahren ist einigen Wissenschaftlern aber aufgefallen, dass chemische Analysen dieser Mantel-Mineralen oft Hinweise auf Spuren von Wasser enthalten. Lange Zeit war jedoch unklar, ob dieses Wasser nicht einfach eine oberflächliche Verunreinigung der Proben ist. Erst durch Anwendung von Infrarotspektroskopie konnte nachgewiesen werden, dass das Wasser in diesen Mineralen in Form von OH-Punktdefekten tatsächlich chemisch in der Kristallstruktur gelöst ist und eindeutig aus dem Erdmantel stammt. Die Konzentrationen sind sehr gering – typischerweise einige 100 ppm (d. h. einige 0,01 Gewichts-Prozent) von Wasser.



Abb. 4: Aufstellung der 6-Stempel-Hochdruckpresse. Der Positioniertisch von SAPHiR ist in einer Grube versenkt, so dass die Probenposition auf einer Höhe mit dem späteren Neutronenstrahl liegt.

Einige 100 ppm Wasser – das klingt nicht spektakulär. Integriert man diese Menge jedoch über das gesamte Volumen des Erdmantels, der von ca. 30 km Tiefe bis zur Kern-Mantel-Grenze in 2.900 km Tiefe reicht, so erhält man ein Wasserreservoir, das vergleichbar ist mit der Masse aller Ozeane zusammen. Der Austausch zwischen diesem tiefen Wasserreservoir und der Oberfläche hat über geologisch lange Zeiträume das Volumen der Ozeane gesteuert. Darüber beeinflusst Wasser jedoch – selbst in geringen Spuren – die Dynamik des Erdinnern. Bereits wenige Prozent Wasser reduzieren den Schmelzpunkt der Gesteine im Erdmantel um mehrere 100 °C. Viele Vulkane, etwa der Mount St. Helens, der Vesuv oder der Ätna, befinden sich daher nicht dort, wo der Mantel besonders heiß ist, sondern dort, wo ihm durch Krustenplatten, die in den Mantel zurücktauchen, Wasser zugeführt wird und dadurch das Gestein aufschmilzt. Darüber hinaus reduzieren selbst geringste Spuren von Wasser, die in der Kristallstruktur von Silikaten als OH-Defekte gelöst sind, die Festigkeit dieser Minerale um Größenordnungen. Es gibt numerische Modelle, die darauf hindeuten, dass es Plattentektonik auf der Erde nur gibt, weil der Mantel Spuren von Wasser enthält. Plattentektonik gibt es auf keinem anderen Planeten des

Sonnensystems. Die Erde ist der Wasserplanet – nicht nur wegen der Ozeane.

Wie genau Wasser im Erdmantel gespeichert wird, wie es die Struktur und die Eigenschaften von Silikatschmelzen beeinflusst und das Deformationsverhalten von Gesteinen ändert, ist bisher noch unzureichend untersucht. Ein Grund dafür ist, dass Röntgenstrahlen, die man normalerweise zu Strukturuntersuchungen verwendet, für Protonen praktisch blind sind. Neutronen wären für solche Untersuchungen sehr gut geeignet, ihre Anwendung in Hochdruckexperimenten ist aber dadurch begrenzt, dass man für Neutronen große Probenvolumina braucht, die sich mit konventionellen Hochdruckapparaturen nicht realisieren lassen.

Das neue Instrument SAPHiR am FRM II

Die Simulation der Bedingungen im tiefen Innern der Erde und anderer Planeten ist eine große Herausforderung für Untersuchungen mit Neutronen. Hierfür müssen die Proben unter einem extrem hohen Druck von 30 bis über

150 kbar (30.000 bis 150.000 Atmosphären) und hohen Temperaturen von 1.200 bis 2.000 °C beobachtet werden. Für diese Experimente wurde das Instrument SAPHiR (Six Anvil Press for High Pressure Radiography and Diffraction) gebaut. Sein Herzstück ist eine neuentwickelte Vielstempelpresse mit einem Koordinatentisch, der die exakte Ausrichtung des Instruments im Neutronenstrahl ermöglicht. Vor kurzem wurde die 70 Tonnen schwere Einheit von Positioniertisch und Presse an der FRM II-Neutronenquelle in Garching als erstes Instrument in der neuen Instrumentenhalle Ost aufgestellt und in Betrieb genommen (Abb. 3 und 4). Zur Erzeugung des Drucks pressen sechs große Stempel mit einer kombinierten Druckkraft von bis zu 2.400 Tonnen (24 MN) auf einen zentralen, würfelförmigen Probenbereich (Abb. 5). Trotz der enormen Presskräfte können die Stempel zueinander mit einer Präzision von besser als einem Mikrometer (tausendstel Millimeter) positioniert werden, was die Kontrolle der extremen Kräfte auf der Probe ermöglicht.

Der Neutronenstrahl wird durch einen Neutronenleiter, eine evakuierte Glasröhre mit einer speziellen neutronenreflektierenden Schicht, an

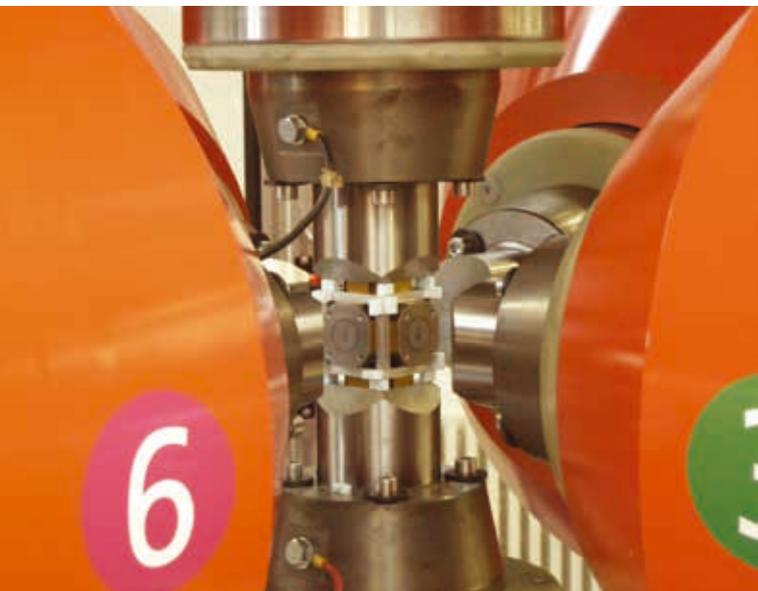
fähigkeit von Neutronen und die gleichzeitige Empfindlichkeit für leichte Elemente können mit dieser Methode z. B. die Verteilung von Fluiden (Wasser, CO₂) und von Schmelzen zwischen den Kristallen abgebildet und die Wechselwirkungen zwischen wässrigen Fluiden und Silikatschmelzen untersucht werden.

Das zweite Verfahren ist die Neutronenbeugung. Die Neutronen werden wegen ihres Wellencharakters in den Kristallgittern der Probe nach dem Bragg'schen Gesetz gestreut und mit speziellen Detektoren gemessen. Hierdurch werden die Kristallstrukturen bestimmt, wobei besonders die Positionen der leichten Elemente wie Wasserstoff und Kohlenstoff aufgelöst werden können. Abgesehen von der Kristallstrukturanalyse kann man mit dieser Methode auch das Fließverhalten von Mineralen im Erdinnern untersuchen.

Durch die exakte Kontrolle der Pressenstempel kann eine Probe extrem langsam und kontinuierlich um Bruchteile eines Mikrometers pro Minute verkürzt werden. Gleichzeitig wird mit unterschiedlich angeordneten Detektorbänken die elastische Veränderung im Kristallgitter gemessen. Durch die Messung kleinster Unter-

schiede parallel und senkrecht zur Verkürzungsachse wird der Spannungszustand der Kristalle bestimmt. Kombiniert mit dem Wissen über die Verformungsgeschwindigkeit der Probe erhält man ein Fließgesetz, das den Zusammenhang zwischen angelegter Spannung und der Verformungsgeschwindigkeit der Gesteine im tiefen Erdinnern beschreibt. So kann man z. B. den Einfluss einer kleinen Menge gelösten Wassers oder von beginnender Aufschmelzung auf die Festigkeit von Mantelgesteinen untersuchen, was für das Verständnis großräumiger Deformationsprozesse wie der Mantelkonvektion und der Plattentektonik notwendig ist. Die Neutronenmessungen an SAPHiR werden im Jahr 2014 starten, sobald die neue Osthalle am FRM II

mit Neutronen versorgt wird. Der Aufbau von SAPHiR und die Durchführung des Projekts werden durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) finanziert.



die Probe gebracht, bis auf wenige Millimeter Durchmesser fokussiert und durch die Stempelrücken auf die Proben geleitet. SAPHiR verwendet zwei unterschiedliche Neutronenmessverfahren. In der Radiographie wird die Probe mit Neutronen durchstrahlt, wobei ähnlich wie bei einer Röntgenaufnahme ein Abbild der inneren Struktur entsteht. Durch die hohe Durchdringungs-

Abb. 5: Geöffnete Hochdruckpresse. Die sechs Primärstempel übertragen ihre Kraft von bis zu 800 Tonnen pro Achse auf die Probenumgebung. Der eng fokussierte Neutronenstrahl wird zwischen den Stempeln auf die Probe geleitet.

DIE AUTOREN

Prof. Dr. Hans Keppler ist Professor für experimentelle Geophysik am Bayerischen Geoinstitut in Bayreuth und Mitglied der Bayerischen Akademie der Wissenschaften.

Dr. Nico Walte ist wissenschaftlicher Mitarbeiter des Instituts und leitet den Aufbau von SAPHiR.