

## Ein Blick ins Innere der Erde

Die Spin-Paarung von  $\text{Fe}^{2+}$  im unteren Erdmantel führt zu einem graduellen Anstieg von Dichte und Kompressibilität

Der physikalische Zustand des tiefen Erdinnern erschließt sich für die Geowissenschaften nur indirekt durch Erkundung von der Oberfläche aus, vor allem mithilfe akustischer Wellen, die sich infolge von Erdbeben durch das Erdinnere ausbreiten. Aus den Laufzeiten solcher Wellen und über die Eigenschwingungen der Erde nach großen Erdbeben erhalten Seismologen heute ein detailliertes Bild über die elastischen Eigenschaften und die Dichteverteilung im Inneren der Erde.

Solche Daten zu interpretieren setzt ein Verständnis der chemischen Zusammensetzung des Erdinnern ebenso voraus wie die Charakterisierung der physikalischen Eigenschaften von Mineralien unter extremen Drücken und Temperaturen. Im tiefen Erdmantel, der sich über eine Tiefe von 660 bis 2900 km erstreckt, herrschen Temperaturen von 1600 bis 3000 K und Drücke von 25 bis 135 GPa. Entsprechende Laborexperimente unter solchen extremen Bedingungen lassen sich mit Diamantstempelzellen durchführen, in denen zwei flach geschliffene Diamanten die Proben mit Abmessungen unterhalb von 0,1 mm zusammendrücken [1]. Da

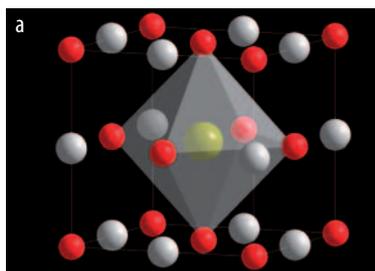
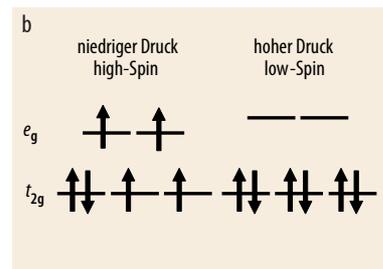


Abb. 1 Kristallstruktur von  $(\text{Mg}_{1-x}\text{Fe}_x)\text{O}$  in B1- oder NaCl-Struktur. Eisen (gelb) ist in der NaCl-Struktur oktaedrisch mit Sauerstoff (rot) koordiniert (a). In diesem Fall

Diamant für ein weites Spektrum elektromagnetischer Strahlung transparent ist, sind zahlreiche Probeneigenschaften in situ messbar. Laser, deren Strahlung den Diamant durchdringt, erhitzen bei ihrer Absorption die Probe. Solche Experimente halfen z. B. dabei, sprunghafte Änderungen akustischer Geschwindigkeiten (seismische Diskontinuitäten) im Erdmantel mit Phasenübergängen in Mineralien zu korrelieren. Röntgenbeugung unter hohem Druck erlaubt es, Phasenübergänge direkt zu beobachten und die  $P$ - $V$ - $T$ -Zustandsgleichung der Hochdruckphasen zu bestimmen. Dank dieser Experimente existiert heute ein robustes mineralogisches Modell des tiefen Erdmantels: Dieser besteht demnach grob geschätzt aus



sind für  $\text{Fe}^{2+}$  die fünf 3d-Orbitale in drei untere ( $t_{2g}$ ) und zwei obere ( $e_g$ ) Zustände aufgeteilt, wobei hoher Druck den low-Spin-Zustand begünstigt (b).

20 %  $\text{MgO}$ , 75 %  $\text{MgSiO}_3$  sowie 5 %  $\text{CaSiO}_3$  in der Perowskit-Struktur (Abb. 1a). Die Mg-Phasen im Erdmantel enthalten auch die anderen chemischen Komponenten des Mantels – vor allem Eisen als  $\text{Fe}^{2+}$  und  $\text{Fe}^{3+}$  (etwa 6 %mol) sowie Aluminium (etwa 2 %mol).

Bereits seit Jahrzehnten wird vermutet, dass sich im tiefen Erdmantel die elektronische Konfiguration von  $\text{Fe}^{2+}$  in Mineralien ändert. Für  $\text{Fe}^{2+}$  sind die fünf 3d-Orbitale in drei untere und zwei obere Zustände aufgeteilt, die durch eine Kristallfeldaufspaltung voneinander getrennt sind (Abb. 1b). Je nach Größe der Aufspaltung, die auch vom Ionenabstand abhängt, nehmen die sechs Valenzelektronen eine high-Spin- oder low-Spin-Konfiguration ein. Ein Übergang vom high-Spin-Zustand,

### KURZGEFASST

#### Josephson-Effekt im BEC

Üblicherweise taucht der Josephson-Effekt in Supraleitern auf, nun wurde er auch in einem Bose-Einstein-Kondensat aus Rubidium-Atomen in einer Magnetfalle nachgewiesen. Hierbei teilt ein stark fokussierter Laserstrahl die Falle in zwei Hälften und bildet eine Barriere, durch welche die Rb-Atome hindurch tunneln können. Durch schnelles Verschieben der Laserbarriere werden die Atome auf einer Seite zusammengedrückt. Um den Druck zu reduzieren, tunneln sie durch die Barriere. Da die Wellenfunktionen der Atome auf beiden Seiten miteinander interferieren, tunneln die Atome hin und her (AC-Josephson-Effekt). Bei langsamem Verschieben der Barriere stellt sich der

DC-Josephson-Effekt ein.

S. Levy et al., Nature 449, 579 (2007)

#### Magnetspeicher ohne Magnetfeld

Mithilfe eines spinpolarisierten Rastertunnelmikroskops gelang es Hamburger Forschern, winzige Nanoinseln berührungsfrei und ohne externes Magnetfeld zu schalten. Dabei zwingt der von der metallischen Spitze ausgehende Tunnelstrom die magnetische Ausrichtung der Nanoinseln in eine bestimmte Richtung. Durch Variation der angelegten Spannung lässt sich die Magnetisierung gezielt in die Bit-Zustände 0 und 1 schalten. Da kein Magnetfeld notwendig ist, ermöglicht diese Methode prinzipiell höchste Speicherdichten.

S. Krause et al., Science 317, 1537 (2007)

#### Lichtschluckendes Schwergewicht

In der Nachbargalaxie M 33 der Milchstraße haben Astronomen das bisher schwerste Schwarze Loch entdeckt. Das Objekt hat knapp die 16-fache Masse unserer Sonne und ist Teil eines Doppelsystems. Der Begleitstern bringt sogar die 70-fache Sonnenmasse auf die Waage. Er umkreist alle dreieinhalb Tage das Schwarze Loch und verdunkelt regelmäßig die Röntgenstrahlung aus dessen Umgebung. Anhand der Bedeckungslänge der Röntgenquelle, der Geschwindigkeit und des Spektrums des Begleitsterns ließen sich die Massen des schwergewichtigen Duos bestimmen. Es lässt sich mit herkömmlichen Modellen der Sternentwicklung nicht in Einklang bringen. J. A. Orosz et al., Nature 449, 872 (2007)

der in Oxiden und Silikaten unter Normaldruck stabil ist, zum low-Spin-Zustand dürfte wichtige geophysikalische Konsequenzen haben: Erstens könnte die Spin-Paarung wegen des geringeren Ionenradius von  $\text{Fe}^{2+}$  im low-Spin-Zustand einen sprunghaften Dichteanstieg des unteren Erdmantels verursachen. Zweitens könnte das veränderte optische Absorptionsspektrum zu einer drastischen Änderung der thermischen Strahlungsleitfähigkeit des Mantels führen und damit die Temperaturverteilung im Erdinnern beeinflussen.

Direkte Hinweise auf druckinduzierte Spin-Paarung in  $(\text{Mg,Fe})\text{O}$  lieferte erstmals die Röntgen-Emissions-Spektroskopie [2]. Seitdem wurde dieser Effekt in zahlreichen Experimenten mithilfe verschiedener Methoden wie der Mößbauer-Spektroskopie [3], optischer Spektroskopie [4] und nuklearer Vorwärtsstreuung [5] eingehend untersucht. Dabei zeigte sich, dass der Übergang vom high-Spin- zum low-Spin-Zustand selbst bei einer Temperatur von 300 K nicht sprunghaft, sondern für  $(\text{Mg}_{1-x}\text{Fe}_x)\text{O}$  mit  $x = 0,1 - 0,2$  über einen weiten Druckbereich von 40 bis 80 GPa stattfindet [2, 3, 6]. Der Spin-Übergang bewirkt einen beachtlichen Dichteanstieg um rund sechs Prozent sowie eine deutlich verringerte Kompressibilität [6].

Dichtefunktionalrechnungen erlauben die Vorhersage des Spin-Zustands von  $(\text{Mg,Fe})\text{O}$  selbst bei hohen Temperaturen, wenn Entropie-Effekte infolge des magnetischen Zustands und der Ordnung von high- und low-Spin- $\text{Fe}^{2+}$  explizit betrachtet werden [7]. Mit dieser Methode fanden Taku Tsuchiya und seine Kollegen, dass der Übergangsbereich für Spin-Paarung bei den hohen Temperaturen im Erdmantel wesentlich breiter ist als bei niedrigen Temperaturen. Einer Arbeitsgruppe um Jung-Fu Lin am Lawrence Livermore National Laboratory gelang es nun, dieses theoretische Modell experimentell zu bestätigen [8] (Abb. 2). Für diese Experimente verwendeten die Wissenschaftler die Röntgen-Emissions-Spektroskopie in einer

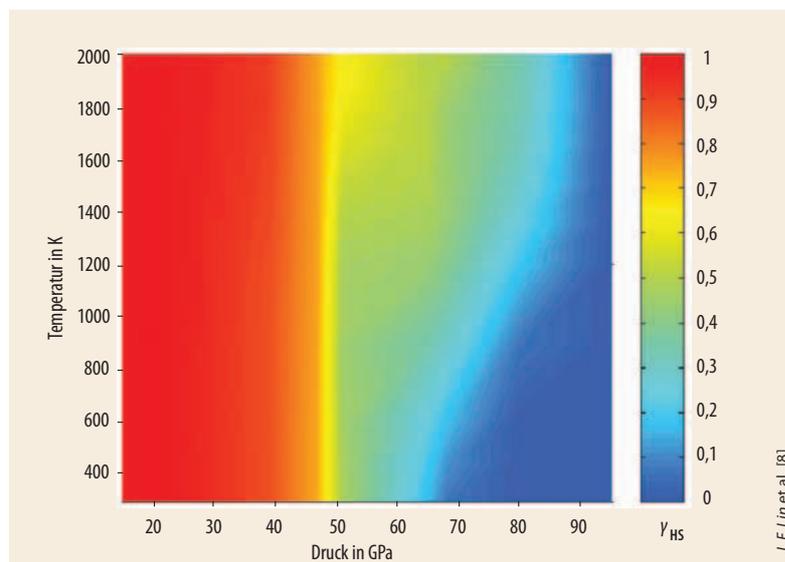


Abb. 2: Der Spin-Übergang von  $\text{Fe}^{2+}$  in  $(\text{Mg}_{0,75}\text{Fe}_{0,25})\text{O}$  als Funktion des Drucks und der Temperatur lässt sich aus experimentellen Messungen des high-Spin-An-

teils mittels Röntgen-Emissions-Spektroskopie ableiten [8]. Die Farben in der rechten Spalte verdeutlichen die high-Spin-Anteile von Eisen,  $\gamma_{\text{HS}}$ , in der Probe.

lasergeheizten Diamantstempelzelle erstmals unter den Bedingungen des tiefen Erdmantels – nämlich bei Drücken bis 95 GPa und einer Temperatur von 2300 K. Gemäß dieser aktuellen Ergebnisse treten die Zustandsänderungen in Dichte und Kompressibilität graduell über ein größeres Druckintervall auf.

Die Spin-Paarung von  $\text{Fe}^{2+}$  im tiefen Erdmantel führt damit nicht wie ursprünglich vermutet zu einer abrupten Änderung der Dichte. Dennoch kann der große Dichteunterschied zwischen den high-Spin- und low-Spin-Zuständen in  $(\text{Mg,Fe})\text{O}$  einen erheblichen Einfluss auf die Dynamik des Erdmantels haben. Denn Dichteunterschiede bestimmen den Auftrieb bei der Mantelkonvektion und damit den Wärmetransport aus dem tiefen Erdinnern an die Oberfläche. Eine intrinsisch dichtere Schicht im tiefen Erdmantel beeinflusst den Wärmetransport in der festen Erde nachhaltig, da das dichte Material stärker aufzuheizen ist, um ihm genügend Auftrieb zu verschaffen und Konvektion im tiefen Erdmantel aufrecht zu erhalten. Eine low-Spin-Schicht im tiefen Erdmantel wirkt sich damit erheblich auf das thermische Profil unseres Planeten aus, wobei der tiefe Erdmantel wärmer ist als bisher angenommen.

Um den Einfluss von Spin-Übergängen auf die Struktur des Erdinnern zu verstehen, muss auch  $(\text{Mg,Fe})\text{SiO}_3$ -Perowskit, die wichtigste Phase des tiefen Erdmantels, berücksichtigt werden. Dort ist die Situation allerdings weit komplizierter, und die Ergebnisse sind kontroverser als im Fall von  $(\text{Mg,Fe})\text{O}$ : In  $(\text{Mg,Fe})\text{SiO}_3$  treten erhebliche Mengen an  $\text{Fe}^{3+}$  auf [5], darüber hinaus erscheint zusätzlich zu den beiden high- und low-Spin-Konfigurationen ein intermediärer Spin-Zustand möglich [9]. Ob der Spin-Übergang in Perowskit nun simultan zu  $(\text{Mg,Fe})\text{O}$  stattfindet, oder erst bei wesentlich höherem Druck, ist weiter offen und bleibt für das Verständnis der Struktur und Dynamik der Erde von großem Interesse.

Gerd Steinle-Neumann

- [1] R. J. Hemley und N. W. Ashcroft, *Physics Today* **51**, 26 (1998)
- [2] J. Badro et al., *Science* **305**, 383 (2003)
- [3] I. Kantor et al., *Phys. Rev. B* **73**, 100101(R) (2006)
- [4] H. Keppler et al., *American Mineralogist* **92**, 433 (2007)
- [5] J. M. Jackson et al., *American Mineralogist* **90**, 199 (2005)
- [6] J. F. Lin et al., *Nature* **436**, 377 (2005)
- [7] T. Tsuchiya et al., *Phys. Rev. Lett.* **96**, 198501 (2006)
- [8] J. F. Lin et al., *Science* **317**, 1740 (2007)
- [9] J. Badro et al., *Science* **305**, 383 (2004)

Dr. Gerd Steinle-Neumann, Bayerisches Geoinstitut, Universität Bayreuth, 95440 Bayreuth