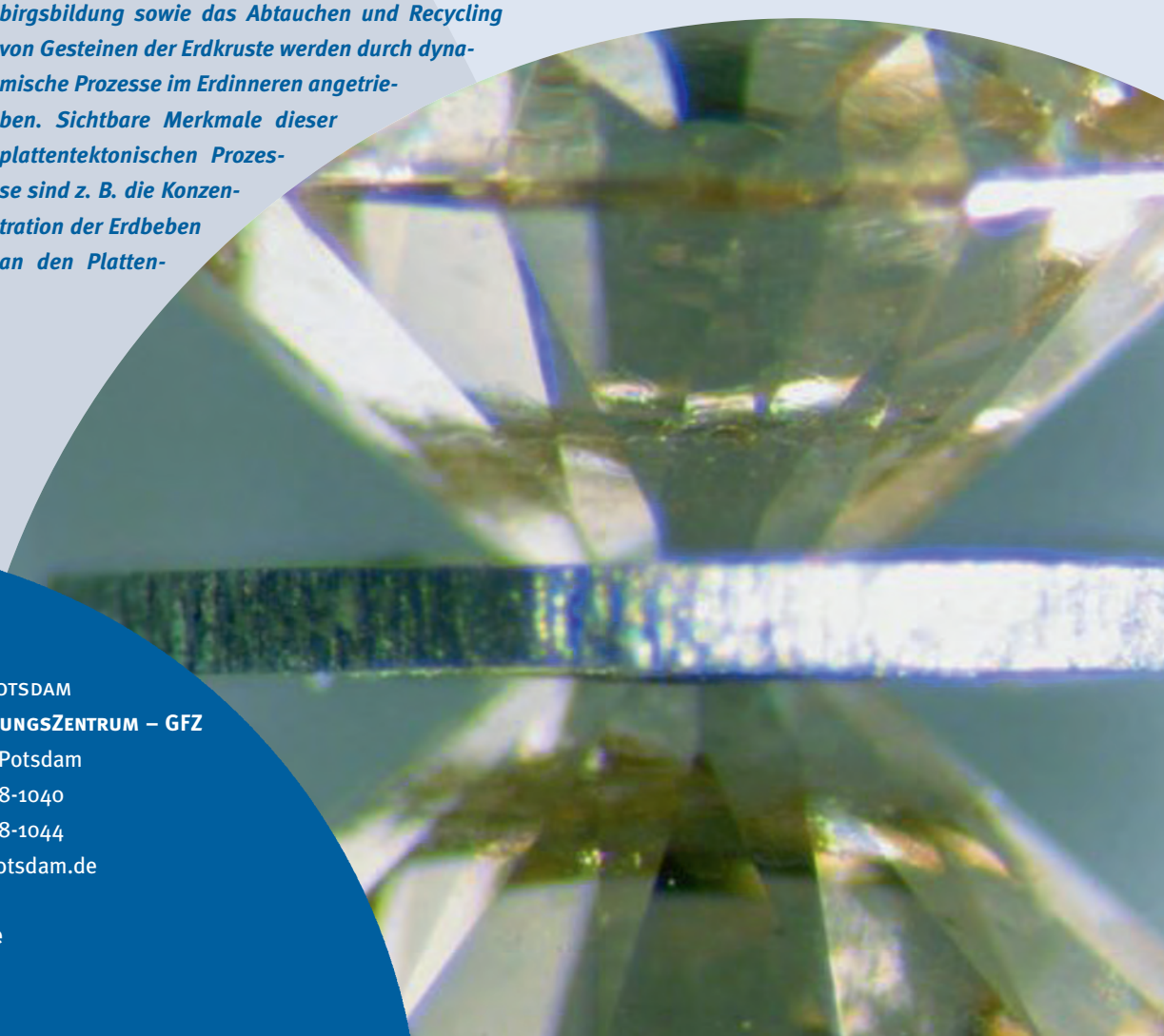
GFZ
Helmholtz-Zentrum
POTSDAM

HELMHOLTZ-ZENTRUM POTSDAM
DEUTSCHES GEOFORSCHUNGSZENTRUM

Hochdruck-Experimente

als „Fenster in das Innere der Erde“

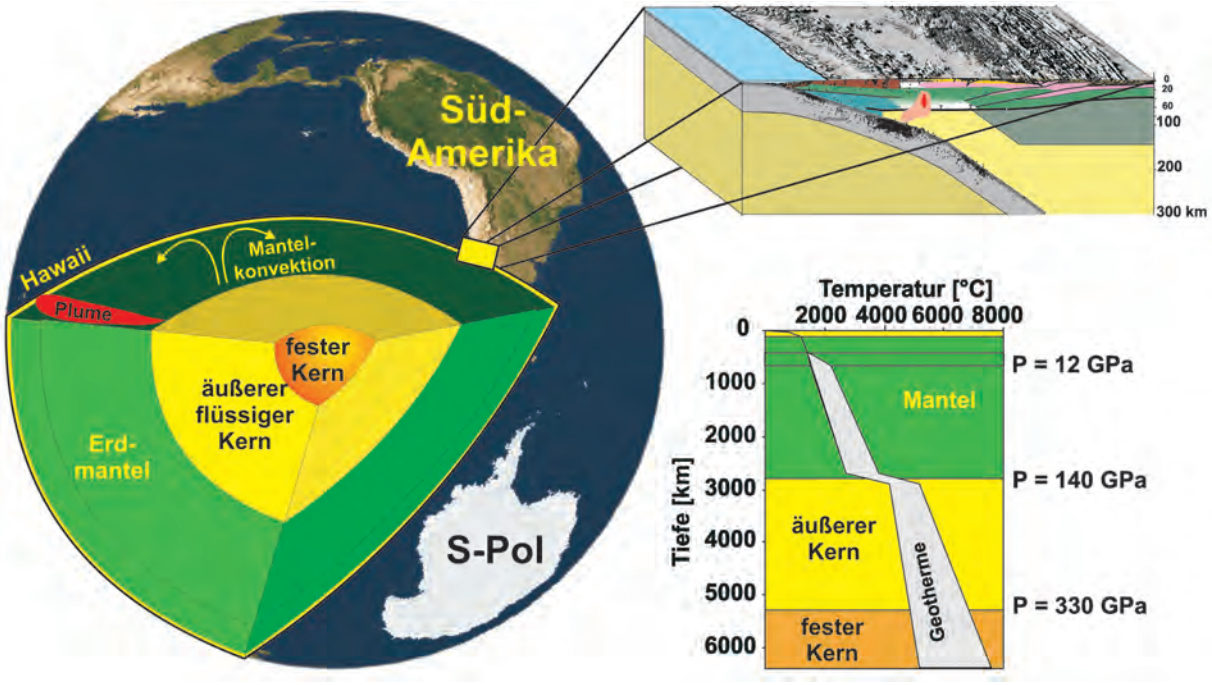
Die Bestimmung der chemischen und physikalischen Eigenschaften von Geomaterialien bei Druck- und Temperaturbedingungen des Erdinneren ist ein wesentlicher Forschungsschwerpunkt der Geowissenschaften. Hochdruckexperimente in Kombination mit seismologischen Messungen haben in den letzten Jahrzehnten einen entscheidenden Beitrag zur Modellierung des Erdaufbaus und der im Inneren ablaufenden Prozesse geleistet. Die Bewegung ganzer Kontinente, vulkanische Aktivitäten, Gebirgsbildung sowie das Abtauchen und Recycling von Gesteinen der Erdkruste werden durch dynamische Prozesse im Erdinneren angetrieben. Sichtbare Merkmale dieser plattentektonischen Prozesse sind z. B. die Konzentration der Erdbeben an den Plattenrändern und die z. T. explosiven vulkanischen Aktivitäten. Wichtige Steuergrößen sind dabei geochemische Reaktionen sowie Transportprozesse im Erdinneren. Bei diesen Vorgängen scheinen wässrige Fluide, d. h. die Wechselwirkung zwischen den Fluiden und den Gesteinen, eine bedeutende Rolle zu spielen. Darüber hinaus sind die elastischen/plastischen Eigenschaften der Geomaterialien bei erhöhten Druck- und Temperaturbedingungen von entscheidender Bedeutung.



Der Diamant – das härteste Mineral der Welt. Mit Diamanten lassen sich extreme Drücke generieren und Prozesse direkt beobachten. (Reiner Schulz, GFZ)

HELMHOLTZ-ZENTRUM POTSDAM
DEUTSCHES GEOFORSCHUNGSZENTRUM – GFZ
Telegrafenberg · 14473 Potsdam
Telefon: +49 (0)331 288-1040
Fax: +49 (0)331 288-1044
e-mail: presse@gfz-potsdam.de

www.gfz-potsdam.de



Schnitt durch die Erde: Prozesse an Plattengrenzen werden z. B. durch Subduktionsvorgänge gesteuert, wenn ozeanische Kruste unter Kontinente abtaucht. Untersuchen lassen sich die entsprechenden Vorgänge mit modernen In situ-Verfahren.

Direkte Beobachtung von Prozessen im Erdinneren

Die direkte Beobachtung dieser Vorgänge ist nur eingeschränkt möglich. Durch Tiefbohrprojekte, z. B. die KTB-Bohrung mit 9101 Metern Tiefe, konnte man nur die obersten Kilometer der Erdkruste untersuchen (Vergleich: Erdradius: 6378 km). Alle tiefer liegenden Prozesse entziehen sich der direkten Beobachtung.

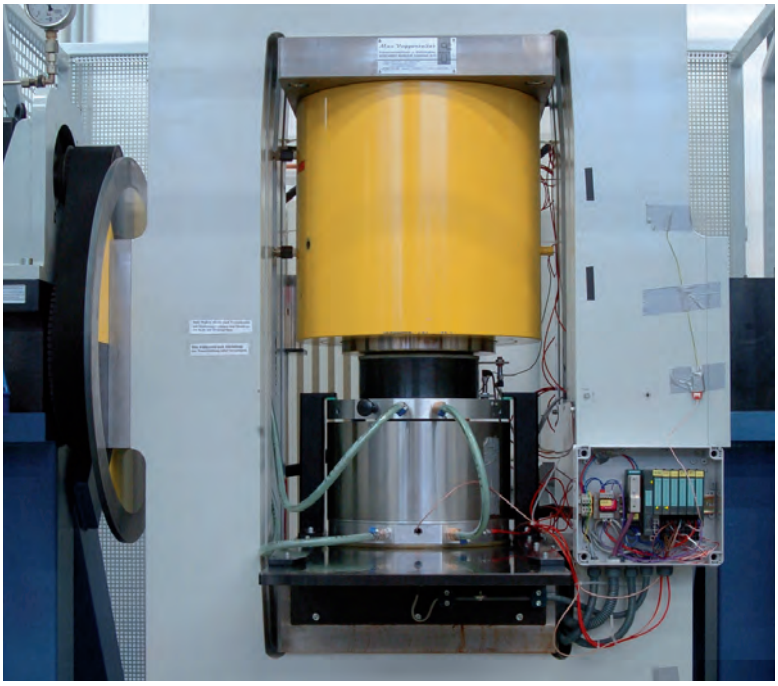
Daher ist es wichtig, Reaktionen und Prozesse, die in der Erde ablaufen könnten, im Labor bei entsprechenden Druck- und Temperaturbedingungen zu simulieren. Man kann das Experiment ex situ, z. B. in einer Vielstempelpresse durchführen, wobei das zu untersuchende Geomaterial über einen vor dem Experiment festgesetzten Zeitraum (Stunden, Tage) bestimmten Druck- und Temperaturbedingungen ausgesetzt, äquilibriert (ins Gleichgewicht gebracht) und dann abgeschreckt wird. Beim Abschrecken wird die Probe in wenigen Sekunden auf Zimmertemperatur abgekühlt und erst dann erfolgt die Druckentlastung. In den meisten Fällen bleibt der Hochdruck-Hochtemperaturzustand des Materials erhalten. Viele – aber nicht alle – Geomaterialien lassen sich abschrecken und werden danach auf ihre Eigenschaften hin untersucht. Dagegen ist etwa die Hochtemperaturmodifikation von Quarz (SiO_2) nicht abschreckbar – solche Materialien werden dann z. B. in Diamantstempelzellen (DAC) untersucht. Der Vorteil der DAC-Experimente ist, dass sie eine direkte Bestimmung der physikalischen und chemischen Eigenschaften der betreffenden Materialien bei erhöhten Druck und Temperatur (In situ-Experimente) erlauben.

Erzeugung von Druck und Temperatur – die Vielstempelpresse

In der Vielstempelpresse können Drücke bis 20 GPa (20 Gigapascal = 200.000 bar) erzeugt werden, was einer Erdtiefe von knapp 600 km entspricht. Gleichzeitig können wir über Stromzufuhr und einen eingebauten Widerstandsofen die Probe Temperaturen bis 2000 °C aussetzen. Im Vergleich zur Diamantstempelzelle kann das Probenvolumen in diesen Experimenten verhältnismäßig gross sein: z. B. im Druckbereich von 10 bis 15 GPa hat die Platinkapsel, in die die Probe eingeschweisst wird, ein Volumen von ca. 9 mm^3. Diese Probenkapsel wird in einen oktaederförmigen Festkörper plaziert, der auf spezielle Weise von acht Wolframkarbidwürfel umschlossen wird. Diese Anordung wird dann in eine hydraulische Presse eingebaut, welche den Druck über die Wolframkarbidwürfel auf die Probe überträgt.

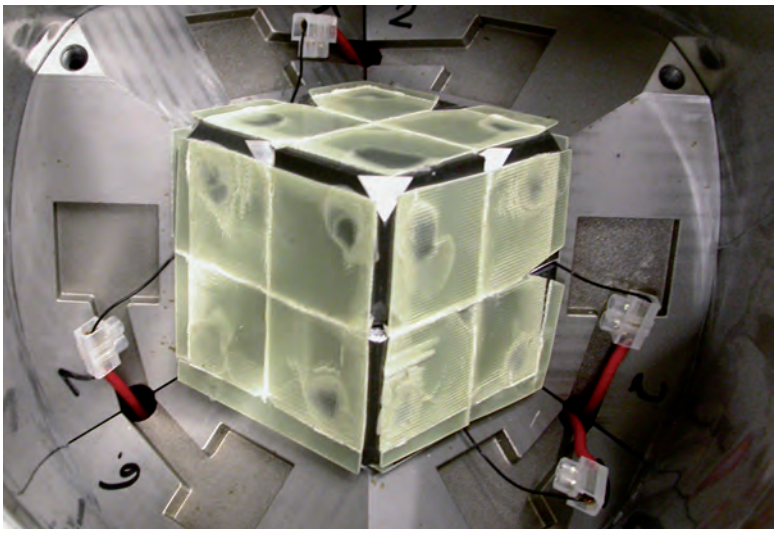
Diamantstempelzellen

Diamanten haben den höchsten Härtegrad und werden daher gerne zur Druckerzeugung eingesetzt. Mit sogenannten Diamantstempelzellen lassen sich statische Drücke bis zu einigen Megabar erzeugen (1 Megabar entspricht dem eine millionenfachen Atmosphärendruck auf der Erdoberfläche). Diamanten haben den entscheidenden Vorteil, dass sie für einen

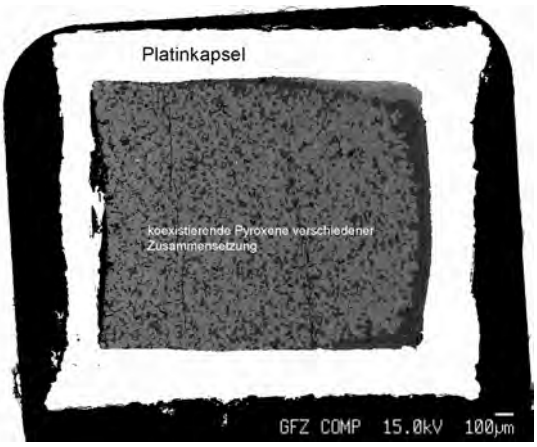


Oben: Vielstempelpresse für Ex situ-Experimente bis 20 GPa und 2000 °C

Unten: Blick in das Walker-Modul auf die speziell angeordneten acht Wolframkarbid-würfel, die den oktaedrischen Festkörper mit der Probe umschliessen



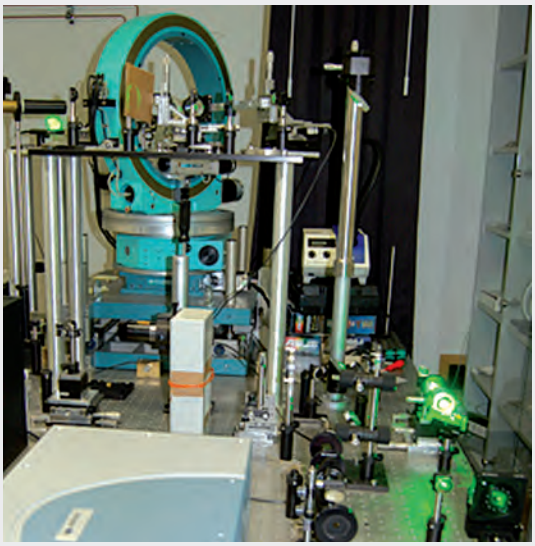
großen Teil des elektromagnetischen Spektrums transparent und daher für In situ-Untersuchungen geeignet sind. Das Prinzip einer solchen Hochdruckzelle ist relativ einfach: zwischen zwei Diamanten liegt eine Metallscheibe als Dichtung mit einer Bohrung, welche einen Durchmesser von ca. 300 µm (1µm = 1/1000 mm) hat und als Probenkammer dient. Dort hinein werden die zu untersuchende Probe sowie Druckmarker (z.B. kleinste Rubinsplitter zur Druckbestimmung) gelegt und die Probenkammer dann mit Gas/Flüssigkeit als Drucküberträger gefüllt. Der Druck wird dann rein mechanisch durch Verringerung des Abstands der Diamanten erzeugt. Um sehr hohe Drücke zu erzeugen, werden sehr kleine Diamanten und damit auch kleinere Bohrungen genommen - entsprechend klein müssen dann auch die Proben sein, etwa 50 µm im Durchmesser. Mit dieser experimentellen Anordnung sind nun eine Vielzahl von In situ-Messungen möglich, z. B. Röntgenbeugungsexperimente zur Strukturbestimmung der Proben, Brillouin-Interferometrie zur Bestimmung der Schallwellengeschwindigkeiten bei hohen Drücken (und Temperaturen), Infrarot-Spektroskopie zur Bestimmung des Wassergehalts in der Probe sowie andere physikalische Messverfahren.



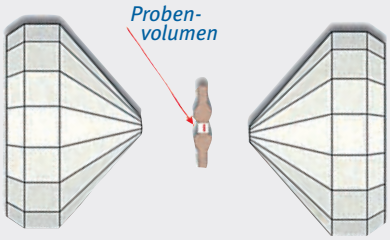
Sekundärelektronenbild eines angeschliffenen Querschnitts durch eine Platinkapsel mit dem Reaktionsprodukt (koexistierende Pyroxenkristalle unterschiedlicher Zusammensetzung, dargestellt durch verschiedene Grautöne). Die Probe wurde in der Vielstempelpresse bei 10 GPa und 1200 °C 24 Stunden äquilibriert, abgeschreckt und chemisch untersucht. Die Zusammensetzung der Pyroxene ist stark von der Temperatur abhängig und dies kann als Geothermometer an natürlichen Gesteinen angewandt bzw. dazu benutzt werden, den Temperaturgradienten im Experiment zu bestimmen.

Was Druck und Temperatur bewirken

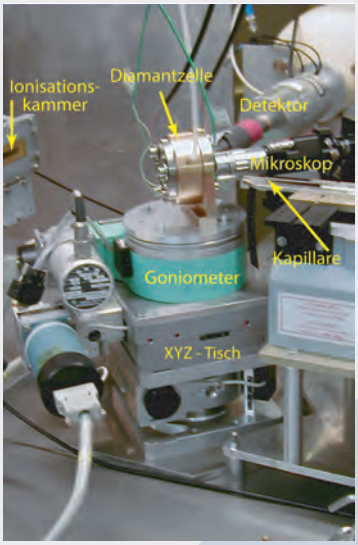
Die Vielstempelpresse wird am GFZ benützt, um die chemische und mineralogische Zusammensetzung der Erdkruste und des Erdmantels und die dort ablaufenden Reaktionen zu untersuchen. Die häufigsten Minerale der Kruste (0 bis 50 km Tiefe) sind Feldspat,



Brillouin-Messstand: Mittels der Brillouin-Interferometrie wird die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Schallwellen bei erhöhten Druck- und Temperaturbedingungen bestimmt.



Diamant-Hochdruckzelle: Mit Diamantzellen können Drücke bis in den Megabar-Bereich erzeugt werden.



Diamantzelle im Synchrotron-Röntgenstrahl zur Bestimmung der Löslichkeiten von Mineralen in wässrigen Lösungen.

Quarz und Pyroxen. Der obere Erdmantel (bis 660 km Tiefe) setzt sich hauptsächlich aus dem Mineral Olivin und seinen Hochdruckmodifikationen Wadsleyit und Ringwoodit zusammen. In der Vielstempelpresse werden diese Minerale synthetisiert bzw. Mineralreaktionen äquilibriert und nach dem Abschrecken chemisch und mineralogisch charaktersiert.

Mit speziell konstruierten Diamantstempelzellen werden am Deutschen GeoForschungsZentrum in situ die Löslichkeiten von Mineralien in wässerigen Lösungen bestimmt. Darüber hinaus wird die Löslichkeit schwerer Elemente in wässrigen Lösungen und Schmelzen bei hohen Drücken und Temperaturen unter Anwendung von Synchrotronstrahlung untersucht. Es hat sich in den letzten Jahren gezeigt, dass die Wechselwirkung Minerale/Elemente und Fluide in der Erdkruste und in den abtauchenden ozeanischen Platten (Subduktionszonen) eine entscheidende Rolle spielt. Die experimentelle Untersuchungen dieser Wechselwirkungen sind daher entscheidend für das Verständnis der in Subduktionszonen und in der Erdkruste ablaufenden Stofftransportprozesse.

Der Aufbau des Erdinneren ist uns größtenteils durch die Bestimmung der Laufzeiten von seismischen Schallwellen (d. h. die Bestimmung der seismischen Schallwellengeschwindigkeit) bekannt. Es ist deshalb von großem Interesse, die seismischen Geschwindigkeiten von verschiedenen Mineralen im Labor bei hohen Drücken/Temperaturen zu bestimmen. Eine Methode hierfür ist die Brillouin-Interferometrie. Hierbei wird ein Laserstrahl von der Probe in der Diamantzelle mit einer geringen Energiedifferenz gestreut. Aus dieser Differenz lässt sich die Schallwellengeschwindigkeit bei den entsprechenden Druck- und Temperaturbedingungen berechnen. So konnte aus Brillouin-Messungen am GFZ geschlossen werden, dass die Anisotropie (unterschiedliche Schallwellengeschwindigkeit in verschiedene Richtungen) im unteren Erdmantel vermutlich durch Ferroperiklas (ein Mineral, das nur 10 bis 20 % des unteren Mantels ausmacht) verursacht wird.

HELMHOLTZ
GEMEINSCHAFT