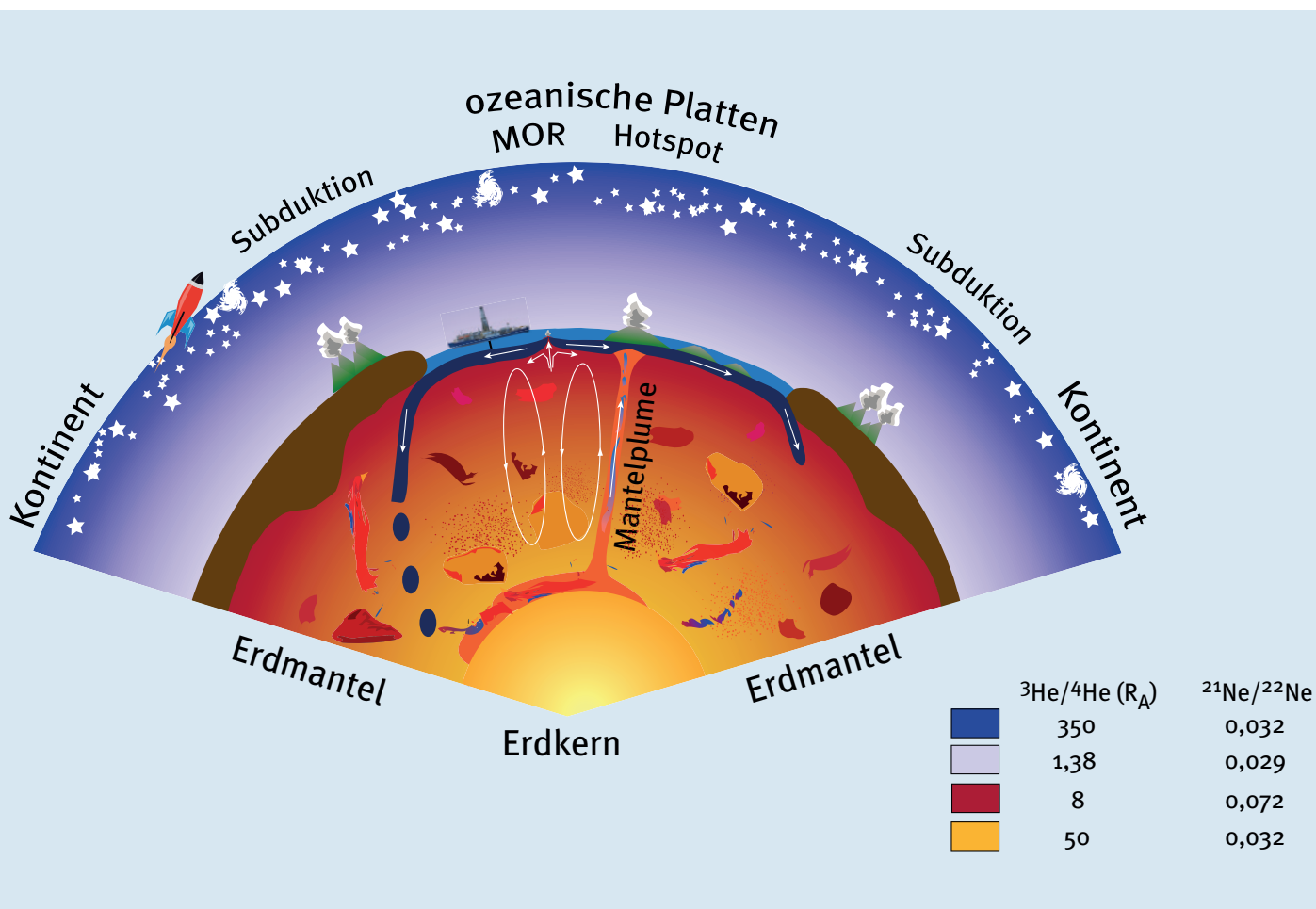


# Edelgase – Fenster zum Erdinnern

Nicole A. Stroncik, Samuel Niedermann  
Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Potsdam

One of the major goals of the Geosciences is to identify and comprehend material cycling in our planet in order to understand mantle geodynamic processes. These processes are fundamental to the formation of the continental crust and the atmosphere, mantle-crust-atmosphere interactions, and planetary formation as a whole. With our systematic, integrated studies of He, Ne, Sr, Nd and Pb isotopes of globally distributed mid-ocean ridge basalts and ocean island basalts we have contributed significantly to refining existing models on the behaviour of He and Ne during melt formation and evolution as well as models of the geochemical structure of the entire mantle. We have e.g. shown that He and Ne are more compatible during melt formation than their mother isotopes  $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$  and  $^{232}\text{Th}$ . Therefore, it is no longer necessary to postulate the existence of a virtually non-degassed, isolated lower mantle reservoir. We have also shown that the upper mantle is chemically heterogeneous at different spatial and temporal scales, indicating that the mixing efficiency of the upper mantle is not as good as previously thought. In addition, based on He, Ne and Ar isotope and trace-element data from the Foundation hotspot we have shown that the associated near ridge seamounts erupt lavas with a trace-element signature characteristic of oceanic gabbro, which indicates the existence of recycled, virtually unchanged oceanic lithosphere in the plume source.



Die Edelgase Helium (He), Neon (Ne), Argon (Ar), Krypton (Kr), Xenon (Xe) und Radon (Rn) bilden die 8. Hauptgruppe im Periodensystem der Elemente. Bedingt durch ihren atomaren Aufbau – die äußere Elektronenschale aller Edelgase ist vollständig gefüllt und hat damit einen stabilen Zustand – können Edelgase nur schwer ein Elektron aufnehmen oder abgeben. Somit erfüllen Edelgase nicht die wesentlichen Voraussetzungen für die Bildung einer chemischen Bindung und sind außergewöhnlich reaktionsträge. Deshalb spricht man bei einer vollbesetzten Elektronenschale auch vom stabilen „Edelgaszustand“ oder der „Edelgaskonfiguration“. Die Tatsache, dass Edelgase im Allgemeinen keine chemische Verbindung eingehen und ihre natürliche Verbreitung nur von physikalischen Prozessen gesteuert wird, machen sich die Geowissenschaften zunutze.

### Edelgase in den Geowissenschaften: Warum?

Der Vorteil der Edelgase als geochemischer Tracer beruht im Wesentlichen auf zwei Sachverhalten: auf großen, charakteristischen Unterschieden in der Edelgasisotopenzusammensetzung zwischen den verschiedenen terrestrischen Reservoiren (Abb. links) und auf ihrer Veränderung durch physikalische Prozesse, wie radioaktive Produktion, Lösung in festen und fluiden Phasen, Entgasung und Mischung. Die für das Studium des Erdmantels wichtigsten Isotope sind  $^3\text{He}$ ,  $^4\text{He}$ ,  $^{20}\text{Ne}$ ,  $^{21}\text{Ne}$ ,  $^{22}\text{Ne}$ ,  $^{36}\text{Ar}$  und  $^{40}\text{Ar}$ .  $^4\text{He}$ ,  $^{21}\text{Ne}$  und  $^{40}\text{Ar}$  sind radiogene Isotope, die durch den radioaktiven Zerfall von  $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$  und  $^{232}\text{Th}$  bzw.  $^{40}\text{K}$  entstehen. Die anderen He-, Ne- und Ar-Isotope sind unter Mantelbedingungen stabil (siehe Toolbox Seite 68).

*Links: Schematischer Schnitt durch die Erde mit den wichtigsten Modellvorstellungen zur Mantelstruktur, Manteldynamik und Plattentektonik (MOR = mittelozeanischer Rücken). Die angegebenen Isotopenverhältnisse für den Erdmantel sind so genannte Endgliedzusammensetzungen, alle anderen gemessenen Werte von Mantelmaterialien entstehen aus deren Mischung und aus Produktion durch radioaktiven Zerfall.  $R_A$  bedeutet, dass das angegebene  $^3\text{He}/^4\text{He}$ -Isotopenverhältnis auf den Luftwert von  $1,39 \times 10^{-6}$  normiert ist. Solar bezieht sich auf im Sonnenwind gemessene Werte.*

*Left: Schematic cross section through the Earth with the most important ideas concerning mantle structure, mantle dynamics and plate tectonics (MOR = Mid-Ocean Ridge). The isotope ratios given for the Earth mantle are endmember values, all other isotope ratios measured in mantle materials result from mixing of those values or from production by radioactive decay with time.  $R_A$  denotes that the measured  $^3\text{He}/^4\text{He}$  isotope ratio is normalised to the air value of  $1.39 \times 10^{-6}$ . Solar refers to values measured in the solar wind.*

Die Lösung von Edelgasen in wässrigen Phasen findet im Gleichgewicht mit der Atmosphäre statt, ist in erster Linie abhängig von Temperatur und Salinität und nimmt systematisch mit der Ordnungszahl zu. In einer Gesteinsschmelze hingegen ist die Löslichkeit abhängig von der Zusammensetzung der Schmelze und vom Atomradius – sie nimmt mit zunehmendem Radius und  $\text{SiO}_2$ -Gehalt ab. He ist etwa fünfzigmal besser löslich als Xe. Daher wird He während der Entgasung im Vergleich zu Ne oder Ar in der Schmelze angereichert, aber in wässrigen Phasen abgereichert. He und Ne spielen eine besonders wichtige Rolle in der Erforschung des Erdmantels. Die Isotope von He und Ne sind über die radioaktive Produktion und durch Mechanismen während der Erdentstehung miteinander gekoppelt. Daher sollten He und Ne im Erdmantel ähnliche Isotopenverteilungsmuster zeigen. Tun sie dies nicht, so ist das ein Hinweis darauf, dass die gemeinsame Entwicklung durch einen sogenannten Fraktionierungsprozess gestört worden ist. Generell bedeutet Fraktionierung die Trennung eines Stoff- oder Isotopengemischs durch physikalische oder chemische Prozesse. Im Falle von He und Ne im Erdmantel muss ein Aufschmelz- und Mischungsprozess oder ein Entgasungs- und Mischungsprozess stattgefunden haben.

Die erwähnten Eigenschaften machen die Edelgase und ihre Isotope zu einem universell einsetzbaren Tracer. So haben Edelgase in der Kosmochemie signifikant zum Verständnis der Entstehung unseres Sonnensystems und der Verteilung der volatilen Phasen darin beigetragen. In der angewandten Geologie werden Edelgase etwa in Lagerstätten- (Erdöl, Erdgas, Erze) und Grundwasseruntersuchungen eingesetzt. Außerdem sind Edelgase in der Erkundung magmatischer Prozesse im Allgemeinen und des Erdmantels und der Erdkruste im Besonderen ein unverzichtbarer Tracer.

### Proben aus dem Erdinneren: Wie?

Das Wissen über die Entstehung und Entwicklung des Erdmantels sowie dessen chemische Struktur beruht auf Untersuchungen magmatischer Proben von der Erdoberfläche (Abb. 1). Die Information darüber, welche Manteltiefe die Probe repräsentiert, stammt im Wesentlichen aus der Seismologie, mittels derer man die physikalische Struktur des Erdinnern charakterisieren kann, und aus der experimentellen Petrologie, mittels derer die physikalischen Eigenschaften von Mineralen ermittelt werden, unter welchen Temperaturen und Drücken sie sich bilden und wie sich bestimmte Spurenelemente während der Mineralbildung verhalten. So haben diese Untersuchungen z. B. gezeigt, dass das Material, welches an Intraplattenvulkanen (wie z. B. Hawaii), so genannten Hotspots, eruptiert wird, aus tiefen Mantelregionen (z. T. von der Kern-Mantel-Grenze) kommen muss und durch „Mantelplumes“ an die Oberfläche transportiert wird (z. B. *Morgan, 1971*). Das Material, das an mittelozeanischen Rücken eruptiert wird, stammt hauptsächlich aus flacheren Mantelregionen (z. B. *Morgan, 1971*).



**Kontakt:** N. Stroncik  
(stroncik@gfz-potsdam.de)

## Edelgas-Massenspektrometer Noble Gas Mass Spectrometer



**Anwendung:** Bestimmung der Konzentration und Isotopenzusammensetzung der fünf stabilen Edelgase Helium (He),

**Analysiertes Material:** Gesteine, Mineralseparate, Wasser, Gase

**Standard:** 0,1 cm<sup>3</sup>-Pipette einer künstlichen Mischung der fünf Edelgase in Stickstoff mit genau bekannten Häufigkeiten; daneben Luft und luftgesättigte Wasserstandards

**Gasextraktion:** Aus Feststoffen entweder thermisch in einem Ultrahochvakuum-Extraktionssofen (bis 2000 °C) oder mechanisch durch Aufmahlen in einem Probenknacker; aus Wasser in einem Ultraschallbad

**Gasreinigung:** Entfernung chemisch aktiver Gase durch Ausfrieren in Kühlfallen und Absorption an aktiven Metalloberflächen (Titan, Zirkon-Aluminium)

**Gastrennung:** Physikalische Adsorption aller Edelgase an Aktivkohle bei 11 K (-262 °C) in einem Kryostaten; anschließend stufenweises Hochheizen zur separaten Freisetzung und Analyse der fünf Edelgase

**Ionisierung:** Erzeugung positiver Ionen in einer Elektronenstoß-Ionenquelle

**Massenseparation:** Beschleunigung der Ionen durch 4,5 kV Hochspannung und Trennung aufgrund der Ionenmasse im magnetischen Sektorfeld

**Ionendetektion:** Faraday-Detektor für häufigste Nuklide (<sup>4</sup>He, <sup>40</sup>Ar), Sekundärelektronen-Vervielfacher mit Diskriminator zur Einzelionenzählung für alle anderen

**Probenmenge pro Messung:** typisch 0,1-1 g Gestein oder Mineral; 20-40 ml Wasser

**Erreichbare Präzision:** Konzentrationen 4-5 % (95 % Vertrauensbasis), Isotopenverhältnisse  $\geq 0,1$  % je nach Häufigkeit

Das untersuchte Probenmaterial stammt sowohl von ozeanischen Inseln und untermeerischen Inselbergen (z. B. Hawaii, Osterinseln) als auch von mittelozeanischen Rückensegmenten im Pazifik und Atlantik (Abb. 2). Neben der Beantwortung spezifischer Fragestellungen, beispielsweise wie Mantelplumes und mittelozeanische Rücken interagieren oder wie atmosphärische Edelgasisotopensignale in Mantelschmelzen gelangen (Stroncik *et al.*, 2008; Stroncik und Niedermann, 2016a), ist das Probenmaterial mit dem übergeordneten Ziel untersucht worden, die chemische Diversität des Erdmantels in Raum und Zeit genauer zu charakterisieren und herauszuarbeiten, welche Erkenntnisse über die Dynamik des Erdmantels abgeleitet werden können.

## Der Erdmantel: Ein überdimensionaler Marmorkuchen?

Mit einem Anteil von etwa 84 Vol. % ( $4 \cdot 10^{24}$  kg) ist der Erdmantel nicht nur das größte geochemische Reservoir auf unserem Planeten (etwa 70 % so wichtiger Elemente wie Ce, Nd, Sm oder Li befinden sich im Erdmantel), sondern auch der Antriebsmotor für die Bewegung der Erdplatten und steuert so auf unterschiedlichen Zeitskalen (bis zu 100 Mio. Jahre) über Gebirgsbildung, Verwitterung, Vulkanismus und Verteilung von Ozeanen und Kontinenten auch das Klima auf der Erde. Er bildet die Region zwischen Erdkern und Erdkruste und hat sich nach der Akkretion der Erde vor etwa 4,46 Mrd. Jahren durch Differenzierungsprozesse vom Erdkern getrennt.

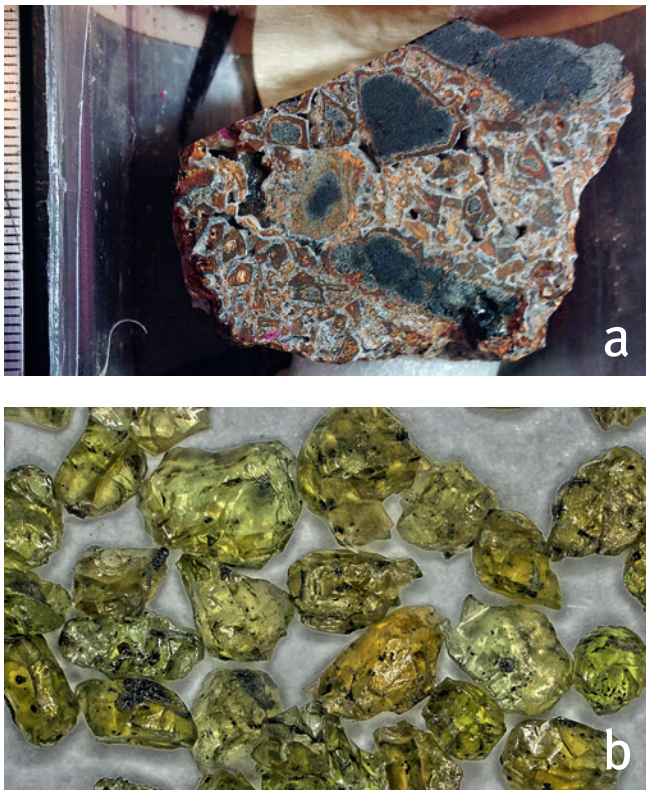


Abb. 1: Typisches Probenmaterial. a) ist eine etwa 4 x 5 cm große Bohrkernprobe aus der ozeanischen Kruste. Untersucht werden hier z. B. die frischen, schwarzen Gläser. b) 2 bis 3 mm große Olivinkristalle (Fotos: N. Stronck, GFZ)

Fig. 1: Typical sample material. (a) is an about 4 x 5 cm large drill core sample from the oceanic crust, the black fresh glasses are the target analysed. (b) 2 to 3 mm large olivine crystals.

Nach dem „Schalenmodell“ der Erde ist der Erdmantel in einen oberen und unteren Teil getrennt, die quasi unabhängig voneinander agieren. Dieses Modell beruht im Wesentlichen auf der Interpretation der Ausbreitungsgeschwindigkeit von Erdbebenwellen. Diese ist von der Materialdichte, der Temperatur und dem Aggregatzustand abhängig. Mittels der Aufzeichnung solcher Wellen wurden mehrere Dichtesprünge im Erdinneren nachgewiesen, die zu der Schlussfolgerung führten, dass die Erde schalenförmig aufgebaut sein muss. Die Kopplung zwischen seismischen Untersuchungen und experimenteller Petrologie zeigt, dass sich an jedem dieser Dichtesprünge die mineralogische Zusammensetzung des Erdinneren ändert. So besteht der obere Mantel überwiegend aus Olivin und Pyroxen, während im unteren Mantel die Hochdruckmodifikation von Olivin, Perovskit, überwiegt. Da seismische und geophysikalische Messungen nur physikalische Materialeigenschaften untersuchen, liefern diese Methoden nur einen Teilaspekt in der Erforschung des Erdinneren. Die Untersuchungen tausender magmatischer Proben mit Man-

telbruchstücken aus bis zu 120 km Tiefe haben gezeigt, dass der Erdmantel zu 90 % aus Sauerstoff, Silizium und Magnesium besteht, gefolgt von Eisen, Aluminium, Calcium und Natrium. Alle anderen Elemente sind im Mantel nur in Spurenkonzentrationen enthalten. Allerdings sind es gerade die Spurenelemente, und unter diesen insbesondere die inkompatiblen, die eine diagnostische Bedeutung für die Entstehung und Entwicklung des Erdmantels haben. Inkompatible Elemente sind solche, die in nur geringen Mengen ins Kristallgitter eingebaut werden; sie bevorzugen die offene, ungeordnete Struktur von Schmelzen. Daher werden sie bei der Schmelzbildung in der Schmelze angereichert und im so genannten Restit verarmt. U, Th,  $^4\text{He}$  und  $^{21}\text{Ne}$  zählen zu den inkompatiblen Elementen.

Die meisten Basalte, deren Schmelzen an mittelozeanischen Rücken eruptieren (MORB = mittelozeanische Rückenbasalte), sind verarmt an inkompatiblen Spurenelementen und zeigen weitestgehend homogene, relativ radiogene He- und Ne-Isotopensignaturen. Das führte zu folgenden Schlussfolgerungen: der obere Mantel ist homogen, an inkompatiblen Elementen verarmt und er ist stark entgast. Komplementär dazu sind Proben der kontinentalen Kruste an inkompatiblen Spurenelementen angereichert und zeigen stärker radiogene He- und Ne-Isotopensignaturen als MORBs. Aus diesen komplementären Spurenelementensignaturen hat man geschlossen, dass sich die kontinentale Kruste infolge ständiger vulkanischer Aktivität aus dem oberen Erdmantel entwickelt haben muss. An Hotspots eruptierte Basalte (OIB = ozeanische Inselbasalte) zeigen variable Isotopensignaturen, die sich jedoch fundamental von MORBs unterscheiden. So zeigt der Großteil der OIBs, vor allem die, die an großen Hotspots wie Hawaii, Island oder Galapagos eruptieren, so genannte primitive He- und Ne-Isotopensignaturen (d. h. hohe  $^3\text{He}/^4\text{He}$ - und niedrige  $^{21}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$ -Verhältnisse), die allerdings mit radiogenen Blei(Pb)- oder mit radiogenen Strontium(Sr)-Isotopensignaturen gekoppelt sind. Die radiogenen Pb- und Sr-Isotopensignaturen lassen sich mit dem Recycling ozeanischer Lithosphäre durch Subduktion in den Erdmantel deuten, während die primitiven He- und Ne-Isotopensignaturen damit erklärt wurden, dass es im tiefen Mantel Bereiche geben muss, die seit der Entstehung der Erde nicht so stark entgast wurden wie die oberen Mantelbereiche (z. B. Hoffmann, 2007). Daraus wurde weiterhin geschlossen, dass diese Bereiche nicht in der gleichen Rate an dem ewigen Kreislauf von Krustenbildung und Recycling durch Subduktion teilnehmen, wie der obere Mantel, da sie sonst stark entgast sein müssten und keine primitiven Edelgasisotopensignaturen zeigen könnten. Das Gesamtbild, das sich daraus ergab, war ein chemisch homogener, dynamischer oberer Mantel, der unabhängig vom heterogenen, wenig dynamischen unteren Mantel konvektiert und damit das strikte Schalenmodell des Erdaufbaus weitestgehend stützte.

So stimmt diese Interpretation der chemischen Signaturen in Zusammenhang mit den Ergebnissen aus der Seismologie und der experimentellen Petrologie und das daraus folgende Modell des Erdaufbaus auf den ersten Blick auch sein mögen, so ergaben sich daraus mehrere Paradoxa: (1) Abgesehen von den Edelgasen

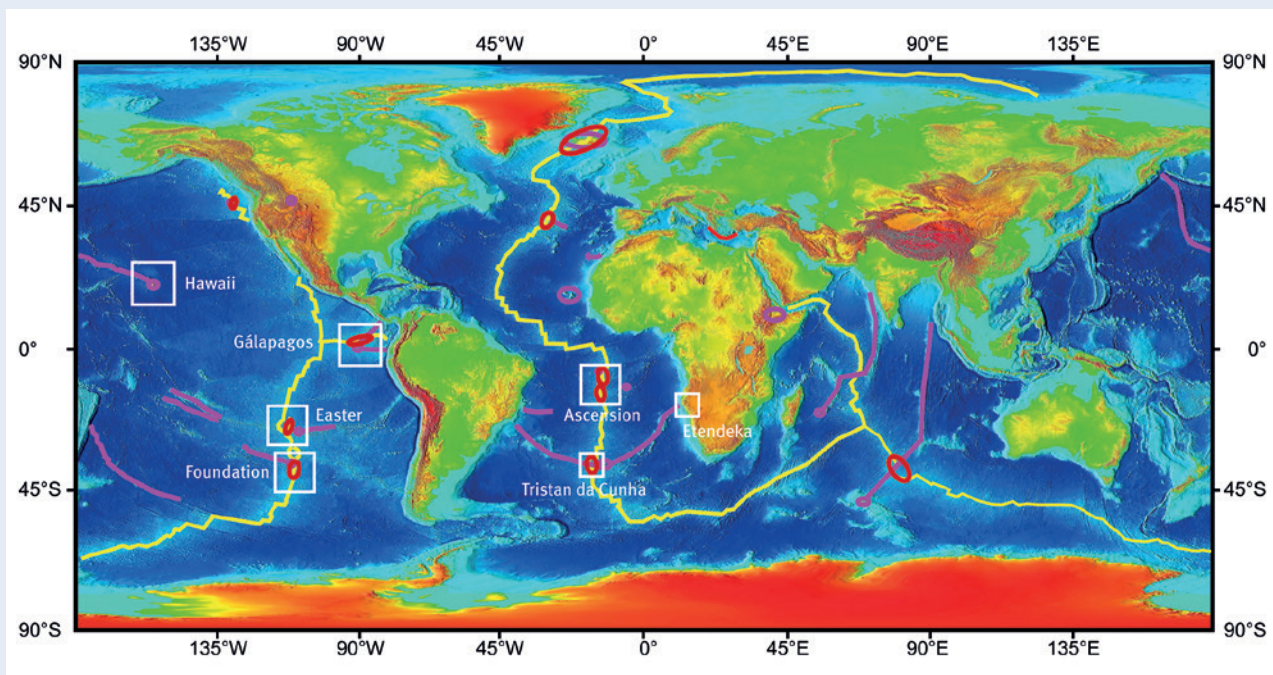


Abb. 2: Reliefkarte der Erde. Gelbe Linien: mittelozeanische Rücken; Magenta: die größten Hotspots mit den dazugehörigen Hotspots Spuren; weiße Quadrate: die am GFZ untersuchten Gebiete; rote Ellipsen: Regionen, in denen Hotspots und mittelozeanische Rücken interagieren

Fig. 2: Global relief map with outlined mid-ocean ridges (yellow), major hotspots with their tracks (magenta), main areas studied at GFZ (white), and plume-ridge interaction settings (red)

haben alle OIBs chemische Signaturen, die zeigen, dass auch die tiefen Mantelbereiche keine geschlossene Entwicklung seit der Erdentstehung durchgemacht haben können; (2) die Quantifizierung von Recyclingraten, basierend unter anderem auf heutigen Subduktions- und Magmenproduktionsraten, zeigt, dass etwa 95 % des gesamten Erdmantels schon einmal die „Recyclingmaschine“ durchlaufen haben muss und (3) zeigen OIBs im Vergleich zu MORBs keine höheren He- und Ne-Konzentrationen. In den letzten 15 Jahren haben die immer besser werdenden Messtechniken sowie die immer detaillierteren Beprobungen der mittelozeanischen Rücken, der ozeanischen Inseln und Seamounts dazu geführt, das Bild vom Aufbau des Erdmantels weiterzuentwickeln. Die im Edelgaslabor des Deutschen GeoForschungsZentrums GFZ durchgeführten Projekte haben einen nicht unerheblichen Teil zu diesem Wandel beigetragen. Dies liegt nicht zuletzt daran, dass dieses Labor zu wenigen weltweit zählt, in denen alle Edelgase am selben Probenanteil gemessen werden können. Dies erlaubt eine stringente Interpretation aller Isotopensignaturen, da es z. B. etwaig vorhandene Heterogenitäten in den Probenanteilen eliminiert. So konnte mittels systematischer, vergleichender Untersuchungen der He-, Ne-, Sr-, Nd- und Pb-Isotope an OIBs und MORBs aus verschiedenen Regionen (Abb. 2) gezeigt werden, dass He und Ne während der Schmelzbildung im Mantel wahrscheinlich

kompatibler sind als ihre Mutterisotope  $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$  und  $^{232}\text{Th}$ . Daher werden He und Ne im Vergleich zu U und Th bei der Aufschmelzung im Restit angereichert. Das bedeutet, dass das Mantelmaterial, welches Träger der primitiven Edelgassignaturen ist, nicht wesentlich weniger stark entgast sein muss und in ähnlichen Raten am Konvektionsprozess teilnehmen kann, als der restliche, tiefe Mantel (z. B. *Stroncik et al., 2007, 2008; Stroncik und Devey, 2011; Stroncik und Niedermann, 2016a, 2016b*). Mit diesen Untersuchungsergebnissen konnte auch denjenigen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler, die das Hotspotmodell als unrichtig betrachten, der Wind aus den Segeln genommen werden. Diese hatten die Tatsache, dass OIBs keine höheren Edelgaskonzentrationen zeigen als MORBs und manche OIBs keine primitiven He- oder Ne-Isotopensignaturen besitzen, als entscheidendes Argument gegen die Plume-Hypothese verwendet.

Am Foundation- und Easter-Hotspot durchgeführte Untersuchungen haben gezeigt, dass sich chemisch weitestgehend unveränderte, subduzierte, ozeanische Lithosphäre mit dem Mantelmaterial mischt, welches die primitiven Edelgasisotopensignaturen in sich trägt (*Stroncik und Devey, 2011*). Dies zeigt, dass Mischungsprozesse im unteren Mantel sehr ineffektiv sein müssen und bestätigt Modelle, wonach der tiefe Mantel nicht sehr dynamisch konvektiert.

Untersuchungen am Mittelatlantischen Rücken zwischen 2° und 15° S zeigen, dass auch der obere Mantel auf verschiedenen räumlichen und zeitlichen Skalen chemisch heterogen sein muss. Dies bedeutet, dass auch die Durchmischungsprozesse im oberen Mantel wesentlich weniger effektiv sind als bisher angenommen (Stroncik und Niedermann, 2016).

Das heute weitgehend akzeptierte Bild (siehe Titelbild dieses Beitrags), welches sich aus diesen und anderen in den letzten 20 Jahren durchgeführten Studien ergibt, ist das eines Mantels, der in seiner Gesamtheit auf verschiedenen zeitlichen und räumlichen Skalen heterogen ist und dessen Durchmischungsdynamiken wesentlich ineffektiver sind als bisher angenommen. Phipps Morgan und Morgan (1998), die sehr früh eine solche Mantelstruktur postuliert haben, sprachen in diesem Zusammenhang von „Marble Cake“ oder „Plum Pudding“-Mantel. Nur dass es sich im Falle des Mantels nicht um einen Marmorkuchen handelt, der aus zwei verschiedenen Geschmackskomponenten besteht, sondern aus vielen verschiedenen.

## Ausblick

Wer glaubt, sich jetzt zurücklehnen zu können, da nun ein stimmigeres Modell zum Aufbau des Erdmantels vorliegt, ist im Irrtum. Denn auch hier gilt, je mehr bekannt ist, desto mehr neue Fragen ergeben sich, und die Herausforderung steckt wie immer im Detail. So lassen sich zwar die Ergebnisse der systematischen He-, Ne-, Sr-, Nd- und Pb-Isotopenuntersuchungen an OIBs und MORBs nur unter der Annahme plausibel erklären, dass He und Ne während der Schmelzbildung kompatibler sind als ihre Mutterisotope und He auch noch kompatibler als Ne ist; ein direkter Beweis ist das aber nicht. Dieser kann nur durch weitere experimentelle Arbeiten zu diesem Thema erbracht werden. Die Beantwortung der Frage, wie Edelgase in Mantelmineralen eingebaut werden und wie sie sich bei der Schmelzbildung verhalten, würde nicht nur die Edelgasforschung weiter voranbringen, sondern auch die Forschung, die sich mit der Entstehung der Erde und der Erdatmosphäre sowie der Planeten im Allgemeinen beschäftigt.

## Literatur

- Hofmann, A. W. (2005): Sampling Mantle Heterogeneity through Oceanic Basalts: Isotopes and Trace Elements. – In: Carlson, R. W., Holland, H. D. (Hrsg.), *The mantle and core*, (Treatise on Geochemistry ; 2), pp. 61-101, 10.1016/B0-08-043751-6/02123-X.
- Morgan, W. J. (1971): Convection plumes in the lower mantle. – *Nature*, 230, 5288, pp. 42-43, 10.1038/230042a0.
- Phipps Morgan, J., Morgan, W. J. (1999) Two-stage melting and the geochemical evolution of the mantle: a recipe for mantle plum-pudding. – *Earth and Planetary Science Letters*, 170, 3, pp. 215-239, 10.1016/S0012-821X(99)00114-4.
- Stroncik, N., Niedermann, S. (2016b): He, Ne and Ar isotope signatures of mid-ocean ridge basalts and their implications for upper mantle structure: A case study from the Mid-Atlantic Ridge at 4–12°S. – *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 183, pp. 94-105, 10.1016/j.gca.2016.04.002.
- Stroncik, N., Niedermann, S. (2016a): Atmospheric contamination of the primary Ne and Ar signal in mid-ocean ridge basalts and its implications for ocean crust formation. – *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 172, pp. 306-321, 10.1016/j.gca.2015.09.016.
- Stroncik, N. A., Devey, C. W. (2011): Recycled gabbro signature in hotspot magmas unveiled by plume-ridge interactions. – *Nature Geoscience*, 4, 6, pp. 393-397, 10.1038/NGEO1121.
- Stroncik, N. A., Niedermann, S., Haase, K. M. (2008): Plume-ridge interaction revisited: Evidence for melt mixing from He, Ne and Ar isotope and abundance systematics. – *Earth and Planetary Science Letters*, 268, 3-4, pp. 424-432, 10.1016/j.epsl.2008.01.037.
- Stroncik, N. A., Niedermann, S., Haase, K. M. (2007): Neon and helium isotopes as tracers of mantle reservoirs and mantle dynamics. – *Earth and Planetary Science Letters*, 258, 1-2, pp. 334-344, 10.1016/j.epsl.2007.03.046.