

Magmatische Kristalle

Mikroarchive vulkanischer Aktivität

Geowissenschaftler*Innen aus Hannover und Bochum gehen den Prozessen, die kurz vor einem Vulkanausbruch in Magmakammern ablaufen, auf den Grund. Basierend auf der Untersuchung magmatischer Minerale versuchen sie, die Dauer des Magmaaufstiegs zu bestimmen. Ziel ist es, den Zeitpunkt sowie Art und Stärke bevorstehender Eruptionen besser vorhersagen zu können.

Abbildung 1
Vulkanausbruch auf La Palma vom November 2021.
Foto: Edgar Zorn, GeoForschungsZentrum GFZ, Potsdam



Vulkane sind Naturphänomene, die die Menschheit seit jeher faszinieren und auch die Entwicklung der menschlichen Zivilisation maßgeblich beeinflusst haben. Neben Erdbeben, Tsunamis, Wirbelstürmen und Überflutungen zählen auch Vulkanausbrüche zu den großen Naturkatastrophen, die viele Menschenleben kosten und große Schäden verursachen können. So haben im vergangenen Jahr die Eruptionen auf La Palma (kanarische Inseln, siehe *Abb. 1*) und der indonesischen Insel

Java, und Anfang dieses Jahres die Explosion des Unterwasservulkans bei Tonga, für großes Aufsehen gesorgt. Blicken wir etwas weiter zurück, so haben der Ausbruch des Mount Pelée auf Martinique (1902) oder der des Vulkans Krakatau in Indonesien (1883 durch einen Tsunami) mehreren zehntausend Menschen das Leben gekostet. Der Ausbruch des Vulkans Tambora 1815 beeinflusste sogar das globale Klima der Folgejahre, so ging das Jahr 1816 in Europa und den USA als das „Jahr

ohne Sommer“ in die Geschichte ein. Sogenannte „schlafende Vulkane“ können viele tausende oder gar zehntausende Jahre ruhen, um dann in Form von gewaltigen Explosionen wieder zu erwachen und viele Kubikkilometer Lava, Gestein und Asche auszuspucken. Hierzu zählen zum Beispiel der Yellowstone Nationalpark in den USA, der jährlich Millionen von Touristen anzieht oder auch der Laacher See in der Eifel, der zuletzt vor etwa 13.000 Jahren ausbrach.

Im Unterschied zum menschengemachten Klimawandel können wir Vulkanausbrüche nicht verhindern. Jedoch nimmt, aufgrund der wachsenden Erdbevölkerung (bald acht Milliarden) und der damit einhergehenden zunehmenden Bevölkerungsdichte, auch die Vulnerabilität der menschlichen Zivilisation durch Vulkanausbrüche zu. Umso wichtiger werden präzise Prognosen bezüglich des

kanischer Gase, die man mit dem Aufstieg und der damit verbundenen Entgasung von Magmen in der Tiefe in Zusammenhang bringt. Die genauen Prozesse sowie der zeitliche Ablauf des Magmaaufstiegs über ein System von kleinen miteinander verbundenen Magmareservoiren in der Erdkruste (in ein bis 30 Kilometern Tiefe), sind jedoch noch unzureichend verstanden, sodass die Signale an der

stopps“ des Magmas in solchen Reservoiren, kommt es häufig zu einer Mischung mit dort bereits vorhandener Schmelze, sodass sich die Umgebung der magmatischen Kristalle auf dem Weg durch die Kruste bis zur Eruption des Magmas mehrmals ändert. Diese Änderungen von Druck, Temperatur und der Magmazusammensetzung werden von den magmatischen Kristallen „aufgezeich-

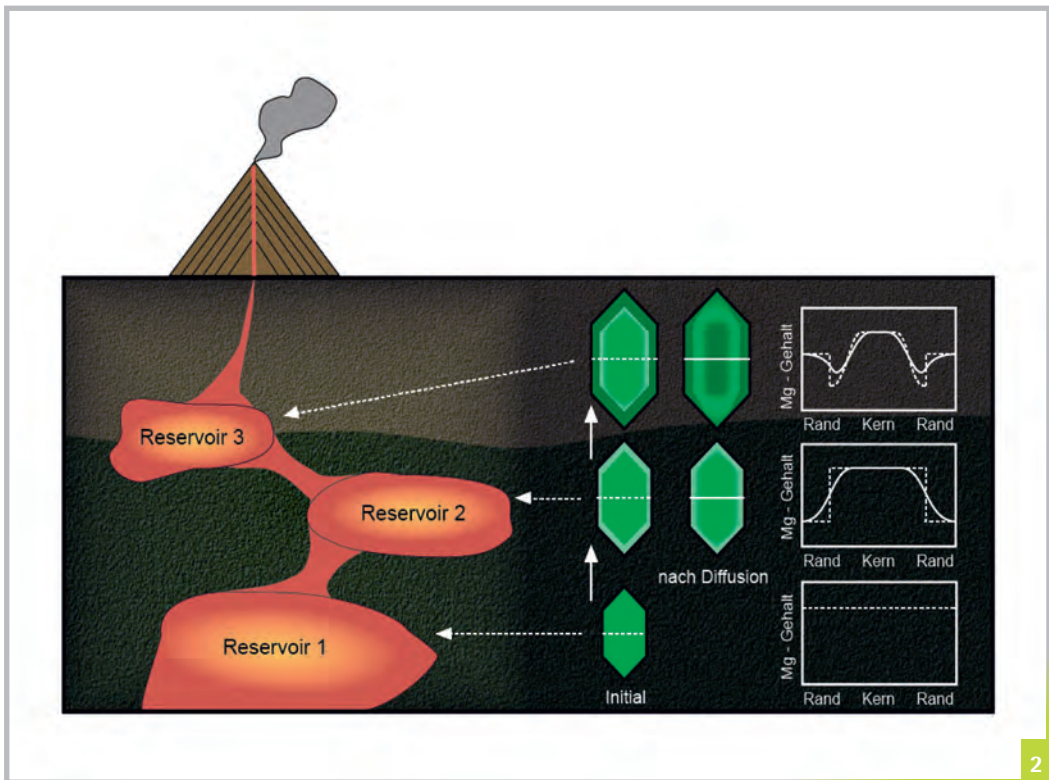


Abbildung 2
 Links: vereinfachter schematischer Aufbau eines vulkanischen Systems mit drei Magmareservoiren in unterschiedlicher Tiefe; rechts: Entwicklung eines magmatischen Olivin Kristalls mit drei Wachstumszonen und einem chemischen „Stufenprofil“ (gestrichelte Linie in den Diagrammen daneben). Durch Diffusion zwischen den Wachstumszonen kommt es zur „Abflachung“ des Stufenprofils (durchgezogene Linie in den Diagrammen). Je kürzer die Verweilzeit eines Kristalls in einem bestimmten Magmareservoir ist, desto steiler ist das Stufenprofil.
 Quelle: Thilo Bissbort (Doktorarbeit, Bochum, 2022)

Zeitpunkts sowie der Art und Stärke von Vulkaneruptionen. Hierzu werden die aktivsten Vulkane auf der Erde, vor allem solche mit dichter Besiedelung, wie zum Beispiel in Italien der Ätna oder der Vesuv, der sich in unmittelbarer Nachbarschaft zur Millionenstadt Neapel befindet, stetig überwacht. Die Überwachung basiert vor allem auf geophysikalischen Methoden (seismische Aktivität, Wärmefluss, über Satelliten gemessene Verformung der Erdoberfläche) sowie der Messung der Menge und Zusammensetzung vul-

Erdoberfläche schwierig zu interpretieren sind. Diese Prozesse werden von Forscher*Innen aus dem Institut für Mineralogie in Hannover zusammen mit Forscher*Innen der Ruhr Universität Bochum in einer von der Deutschen Forschungsgemeinschaft geförderten Forschungsgruppe (FOR 2881) untersucht. Im Fokus ihrer Forschung stehen magmatische Kristalle, die sich in verschiedenen Magmareservoiren der Erdkruste bilden (Abb. 2). Während diverser „Zwischen-

net“. Passend zu den sich ändernden Bedingungen, bilden sich Wachstumszonen mit unterschiedlichen chemischen Zusammensetzungen. Solche Kristalle können somit als eine Art „Mikroarchiv“ benutzt werden, vergleichbar mit Baumringen, welche die sich verändernden klimatischen Bedingungen während des Baumwachstums aufzeichnen. Aus diesen Daten kann man zum Beispiel abschätzen, bei welchen Drucken und Temperaturen sich die Minerale gebildet haben. Aus den Drucken kann man dann die Tiefe

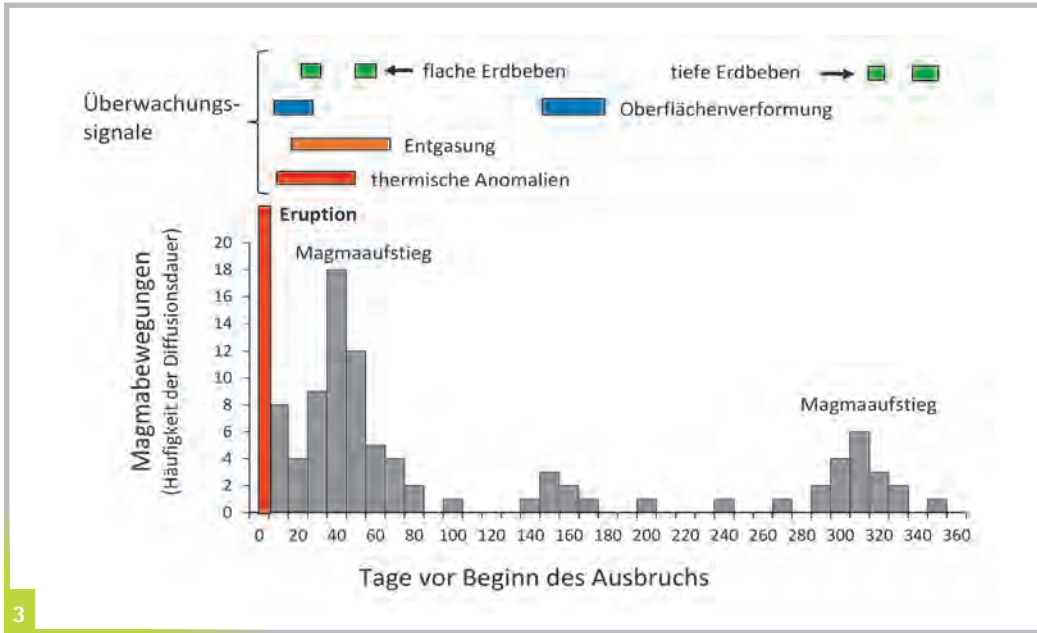


Abbildung 3 Exemplarisches (fiktives) Histogramm, das den Zusammenhang zwischen der Magmabewegung durch die Erdkruste, rekonstruiert durch Diffusions-Chronometrie in magmatischen Mineralen, und an der Oberfläche gemessenen Überwachungssignalen aufzeigt .
Quelle: ähnlich wie in Kahl et al. *Earth and Planetary Science Letters* 308 (2011) 11–22 und Costa et al., *Nature Reviews* (2020) doi.org/10.1038/s43017-020-0038

berechnen, in der sich die verschiedenen Zonen der Kristalle gebildet haben.

Des Weiteren können die Kristalle aber auch als eine Art „Stoppuhr“ verwendet werden, welche die Zeit, die ein Kristall in einer bestimmten Umgebung (Magmareservoir) verbringt, aufzeichnet. Dies hängt damit zusammen, dass die Kristalle immer danach streben ein chemisches Gleichgewicht mit der Umgebungsschmelze zu erreichen. Wenn sie nun in eine Magmakammer mit anderer Schmelzzusammensetzung transportiert werden, versuchen sie, dieses Gleichgewicht über chemische Diffusion im Kristall, die eine Funktion der Zeit ist, wieder zu erlangen. Die Ausdehnung des chemischen Diffusionsprofils kann somit zur Bestimmung der Diffusionszeit verwendet werden. Diese Methode wird auch „Diffusions-Chronometrie“ genannt. Der Vorteil dieser Methode ist zum einem, dass die Diffusionsgeschwindigkeit verschiedener Elemente in verschiedenen Mineralen sehr unterschiedlich ist, sodass sowohl lange Zeiträume von vielen hundert Jahren, als auch

sehr kurze Zeiträume von wenigen Stunden erfasst werden können. Zum anderen findet messbare Diffusion nur bei hohen Temperaturen statt und endet bei magmatischen Prozessen nach der Eruption des Magmas, wenn die Temperatur schlagartig mit der Erstarrung der Laven abnimmt. Somit hat die Methode den Vorteil, dass man mit ihr die Dauer von magmatischen Prozessen bestimmen kann, die bereits Millionen von Jahren zurückliegen. Die Geschichte der Kristalle bleibt in Form einer Diffusionszonierung als Aufzeichnung erhalten (Abb. 2), die mit moderner Analytik, wie Elektronenmikroskopie, Elektronenstrahl-Mikrosonden und Laser Ablation, gekoppelt mit Massenspektrometrie in Hannover und Bochum gemessen werden kann. Ein Schwerpunkt der oben genannten Forschungsgruppe ist es, mit gezielten Experimenten die Diffusionsgeschwindigkeit verschiedener Elemente in den häufigsten magmatischen Mineralen, Olivin, Pyroxen und Plagioklas sowie ihre Abhängigkeit von verschiedenen Faktoren, wie zum Beispiel der Temperatur, zu bestimmen und damit die „Uhr“ der Kris-

talle zu kalibrieren. Außerdem sollen die kalibrierten Uhren in Form einer Software zur Anwendung von Diffusions-Chronometrie für andere nutzbar gemacht werden.

Ziel unserer Forschung ist es, die von uns bestimmten Verweilzeiten des Magmas in bestimmten Magmareservoiren mit den Daten aus der Überwachung von Vulkanen, wie zum Beispiel der seismischen Aktivität, zu korrelieren (siehe Abb. 3). Damit bekommen wir ein besseres Verständnis von der genauen Magmabewegung im Untergrund, welches für die Interpretation der Überwachungssignale bei zukünftigen Ausbrüchen sehr hilfreich sein kann. Zum anderen können wir die Diffusions-Chronometrie auch bei Vulkanen anwenden, deren letzter Ausbruch schon sehr lange zurückliegt, um den Magmaaufstieg von bestimmten Eruptionen im Nachhinein zu rekonstruieren. Dies ist besonders für die explosivsten und gefährlichsten Vulkane der Erde interessant, wie zum Beispiel der Yellowstone (USA) oder der Laacher See Vulkan (Eifel), die sehr lange Ruhephasen haben, bevor sie wieder aktiv werden. Von solchen Vulkanen können wir mit einer Kombination von langsam- und schnell-diffundierenden Elementen die Produkte der letzten Eruptionen untersuchen und somit die Magmabewegungen der letzten hundert Jahre, aber auch der letzten Monate oder sogar Tage vor dem Vulkanausbruch erfassen. Diese Erkenntnisse können dann in die Überwachung dieser Vulkane einbezogen werden und ermöglichen eine bessere Interpretation der Überwachungssignale. Damit kann im Falle eines möglichen Ausbruchs zeitnah und zielgerichtet reagiert werden, zum Beispiel mit Evakuierungsmaßnahmen, deren Umfang natürlich maßgeblich von der erwarteten Stärke des Vulkanausbruchs abhängt.



Prof. Dr. Stefan Weyer

Jahrgang 1967, ist seit 2010 Professor für Geochemie am Institut für Mineralogie der naturwissenschaftlichen Fakultät der LUH. Sein Forschungsschwerpunkt liegt in der Entwicklung isotopengeochemischer Methoden zur Charakterisierung von Stoffflüssen in der tiefen Erde und an der Oberfläche. Er ist seit 2018 im Vorstand von FZ:GEO. Kontakt: s.weyer@mineralogie.uni-hannover.de



Prof. Dr. rer. nat. Francois Holtz

Jahrgang 1960, ist seit 1996 Professor für Petrologie am Institut für Mineralogie der LUH. Zudem ist er Ko-Sprecher des FZ:GEO. Der Schwerpunkt seiner Forschung liegt auf Simulationen von geologischen Hochtemperatur – Prozessen im experimentellen Labor. Kontakt: f.holtz@mineralogie.uni-hannover.de



Prof. Dr. Sumit Chakraborty

Jahrgang 1959, ist seit 1999 Professor für Physikalisch-chemische Mineralogie am Institut für Geologie, Mineralogie und Geophysik an der Ruhr-Universität Bochum. Er entwickelt Methoden der Diffusionschronometrie um Zeitskalen von Prozessen in der tiefen Erde zu charakterisieren und quantifizieren. Er ist aktuell der Präsident der Geochemical Society. Kontakt: sumit.chakraborty@ruhr-uni-bochum.de



M.Sc. Linda Sobolewski

Jahrgang 1991, ist Doktorandin an der Ruhr-Universität Bochum und untersucht für ihre Promotion Vulkan-Eis-Interaktionen im Krater des Mount St. Helens. Seit Mai 2021 ist sie außerdem Projektkoordinatorin der von der DFG geförderten Forschungsgruppe „Diffusion Chronometry of Magmatic Systems“. Kontakt: linda.sobolewski@ruhr-uni-bochum.de