

**DEN
HIMMEL
BETRACHTEN**

**DIE
HÖLLE
VERSTEHEN**

DEN HIMMEL BETRACHTEN, DIE HÖLLE VERSTEHEN

TELEGRAMM AUS DEM INNERN DER ERDE

NICOLE BOBROWSKI & ULRICH PLATT



DR. NICOLE BOBROWSKI wurde im Jahr 2005 an der Universität Heidelberg promoviert. Danach arbeitete sie drei Jahre lang im Nationalen Institut für Geophysik und Vulkanologie in Palermo, Italien. Seit 2009 ist sie wissenschaftliche Mitarbeiterin im Institut für Umweltphysik der Universität Heidelberg. Ihr Forschungsschwerpunkt ist die Halogenchemie in Vulkangasen.

Kontakt: nicole.bobrowski@iup.uni-heidelberg.de

Im Jahr 1864 beschrieb der französische Schriftsteller Jules Verne die Reise zum Mittelpunkt der Erde. In der Realität ist es den Wissenschaftlern bis heute nicht gelungen, in das geheimnisvolle Innere unseres Planeten vorzustoßen. Wir müssen uns mit indirekten Hinweisen begnügen, beispielsweise mit Gasen, die von Vulkanen – den Toren zum Innern der Erde – freigesetzt werden. Die in Vulkanfahnen nachweisbaren Gase erlauben Rückschlüsse auf Vorgänge unter der Erdkruste und können genutzt werden, um drohende Vulkanausbrüche vorherzusagen. Ein neuer Kandidat für ein präziseres Frühwarnsystem ist das Spurengas Brommonoxid.



PROF. DR. ULRICH PLATT wurde im Jahr 1989 als Professor für Experimentalphysik an die Universität Heidelberg berufen. Zuvor forschte er mehrere Jahre am Institut für Atmosphärische Chemie der Kernforschungsanlage Jülich sowie am Statewide Air Pollution Research Center der University of Riverside in Kalifornien, USA. 1984 folgte die Habilitation im Bereich Geophysik an der Universität Köln. Seit 1990 ist Ulrich Platt Direktor am Heidelberger Institut für Umweltphysik. In dieser Funktion leitet er zahlreiche Forschungsprojekte, die sich mit dem physikalischen Verständnis unserer Umwelt befassen. Er entwickelte maßgeblich die Methode der Differentiellen Optischen Absorptions-Spektroskopie (DOAS).

Kontakt: ulrich.platt@iup.uni-heidelberg.de

D

„Denke ich an Neapel, ja gar nach Sizilien, so fällt es einem sowohl in der Erzählung als in Bildern auf, dass in diesen Paradiesen der Welt sich zugleich die vulkanische Hölle so gewaltsam auftut und seit Jahrtausenden die Wohnenden und Genießenden aufschreckt und irre macht.“

Johann Wolfgang von Goethe, Italienische Reise I

In zahllosen Legenden und Sagen sind Vulkane die Wohnstätten von Göttern – oder die Tore zur Hölle. Der Halemaumau auf Hawaii etwa wird als Heimstätte der Vulkan Göttin Pele beschrieben, und der Ätna auf Sizilien galt den Griechen als Sitz des Feuergottes Hephaistos. Hitze und Schwefelgeruch trugen sicher ihren Teil dazu bei, Vulkane als Pforten zur Hölle zu verstehen. Island beispielsweise galt wegen seiner häufigen Vulkankatastrophen als Heimat des Teufels und der isländische Vulkan Hekla als Eingang zur Hölle.

Vulkane beeindruckten uns durch die unfassbar große Gewalt, mit der sie die als unverwundbar erscheinende Erdoberfläche aufreißen. Tonnen von glühendem Material stürzen dann von den Flanken der „Höllenschlunde“ herab, heißes Gestein wird kilometerhoch in die Luft geschleudert. Doch Vulkane haben nicht nur eine zerstörerische, sondern auch eine schöpferische Kraft: Gase, die aus dem Erdinneren entweichen, nachdem sich die junge Erde gerade geformt hatte, haben vermutlich zum Entstehen Lebewesen und der Atmosphäre beigetragen.

Gase aus dem Inneren der Erde

Neben Wasserdampf ist Kohlendioxid (CO₂) das von Vulkanen am meisten ausgestoßene Gas. Der vulkanische

CO₂-Ausstoß beträgt global weniger als ein Prozent der von Menschen verursachten Kohlendioxid-Emissionen. Dennoch spielt der CO₂-Ausstoß von Vulkanen für den globalen Kohlenstoffkreislauf eine wichtige Rolle. Würde dieser „Recycling-Prozess“ des Kohlenstoffes in der Gesteinshülle unserer Erde, der Lithosphäre, gestoppt, würde uns schon nach nur circa 200.000 Jahren der Kohlenstoff in den Oberflächenreservoirs – Ozean, Biosphäre und Atmosphäre, ausgehen. Seit rund zehn Jahren ist die Gasemission von Vulkanen einer der Forschungsschwerpunkte im Institut für Umweltphysik der Universität Heidelberg. Wir wollen verstehen, wie vulkanische Gase die Atmosphäre beeinflussen – und wir wollen auf diese Weise zu Informationen über Vorgänge kommen, die sich im Innern der Erde abspielen. Wir studieren also gleichsam den Himmel, um die Hölle zu verstehen. Dazu nutzen wir eigens geschaffene Werkzeuge.

Vor mehr als drei Jahrzehnten war Ulrich Platt, damals noch in Jülich, maßgeblich daran beteiligt, die sogenannte Differentielle Optische Absorptionsspektroskopie, kurz DOAS, zu entwickeln. Mit dieser verfeinerten Methode der gängigen Absorptionsspektroskopie, die die Abschwächung des Lichts während seines Durchgangs durch Materie – in unserem Fall durch die Atmosphäre – beschreibt, können die individuellen Absorptionsmuster von Molekülen aufgetrennt werden. So, wie sich anhand eines Fingerabdrucks ein Mensch identifizieren lässt, lassen sich Moleküle in der Atmosphäre anhand absorbiertes Wellenlängen des Lichts identifizieren. Die Stärke der Abschwächung gibt zudem Aufschluss darüber, in welcher Konzentration die Moleküle vorhanden sind. Mittlerweile entwickelte Miniaturspektrographen und spezielle Messgeometrien – vor allem die ebenfalls aus Heidelberg stammende Multiaxiale Differentielle Optische Absorptionsspektroskopie (MAX-DOAS) – ermöglichen es heute darüber hinaus, den Himmel systematisch „abzutasten“.

Überraschende Entdeckung

Ein tragbares und mobil verwendbares MAX-DOAS-Gerät ist seit dem Jahr 2002 verfügbar. Erstmals eingesetzt haben wir es für Testmessungen am Solfatara-Vulkan in der Nähe von Neapel; anschließend haben wir es benutzt, um die Abgasfahne des Vulkans Soufrière Hills auf der Karibikinsel Montserrat zu vermessen. Das ursprüngliche Ziel dabei war es, Schwefeldioxid zu bestimmen – dann jedoch entdeckten wir im Mai 2002 in der Abgasfahne des Soufrière Hills überraschenderweise Brommonoxid (BrO), ein sehr reaktionsfreudiges Spurengas. Brommonoxid hat Auswirkungen auf die Oxidationskapazität unserer Atmosphäre. Es spielt vermutlich eine bedeutende Rolle bei der Verbindung von Quecksilberdampf mit Sauerstoff und beeinflusst so die Aufnahme von Quecksilber durch Lebewesen. Auch auf den Schwefel- und Stickstoffkreislauf nimmt das Spurengas Einfluss.

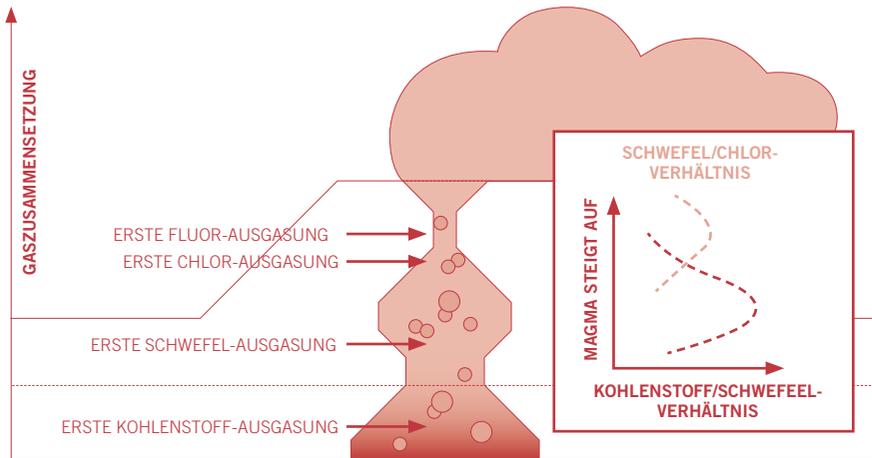


Abbildung 1

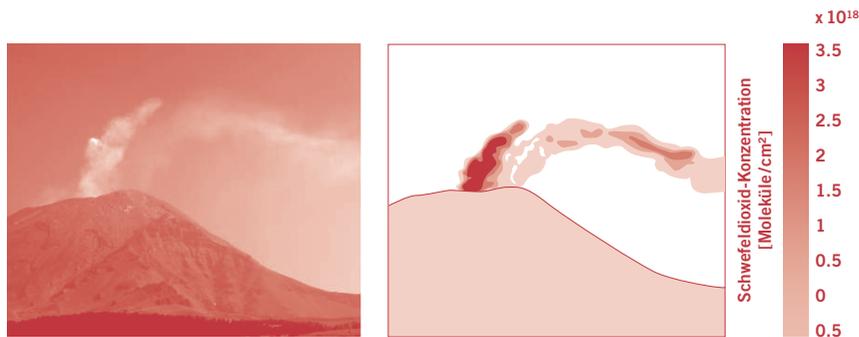


Abbildung 2

Abbildung 1

Die Zusammensetzung der Vulkanausgasungen ändert sich mit dem Aufsteigen des Magmas. Wenn Magma nach oben steigt, erhöht sich zunächst das Kohlenstoff/Schwefel-Verhältnis. Je geringer der Abstand zur Oberfläche ist, desto höher wird das Schwefel/Chlor-Verhältnis.

Abbildung 2

Die Grafik zeigt die Konzentrationsverteilung von Schwefeldioxid in den Ausgasungen des mexikanischen Vulkans Popocatepetl im März 2011. Gemessen wurde die Konzentration mithilfe der Absorptionsspektroskopie, die es erlaubt, Untersuchungen an Vulkanen während explosiver Phasen vorzunehmen.

Die auf Montserrat bestimmten Brommonoxid-Mischungsverhältnisse waren die höchsten, die je in der Atmosphäre gefunden worden waren. Der überraschende Befund weckte das Interesse vieler Atmosphärenchemiker, die sich nun der Frage annahmen, wie die bislang weitgehend unbeachtet gebliebenen Vulkanfahnen die Atmosphäre beeinflussen. Viele Vulkanfahnen wurden seither auf ihren Gehalt an Brommonoxid vermessen. Dabei zeigte sich: Der Soufrière Hills auf Montserrat ist kein Einzelfall. Es stellte sich außerdem heraus, dass Brommonoxid größtenteils wohl nicht direkt emittiert wird, sondern wahrscheinlich erst im Zusammenspiel der Vulkangase mit der Atmosphäre entsteht. Unter anderem wird Sonnenlicht benötigt, damit sich Brommonoxid bilden kann. Dies konnten wir erstmals am Masaya-Vulkan in Nicaragua nachweisen. Tag und Nacht untersuchten wir die Vulkanfahne über dem Krater mithilfe künstlicher Lichtquellen. Das Ergebnis: Obwohl das Brommonoxid tagsüber gut messbar war, fiel seine Konzentration nachts auf nicht mehr nachweisbare Werte.

„Wochen vor dem Ausbruch des philippinischen Vulkans Pinatubo im Jahr 1991 wurden ansteigende Ausgasungen von Schwefeldioxid gemessen. Zehntausende von Menschen konnten so rechtzeitig evakuiert werden.“

Außer Brommonoxide haben wir zwischenzeitlich in der Vulkanfahne des Ätnas und des Vulkans Sakurajimas in Japan auch Chloroxide aufspüren können. Wie reaktives Brom beeinflusst reaktives Chlor den Ozonhaushalt und den Schwefelkreislauf. Im Verständnis der Chlorchemie stehen wir jedoch noch ganz am Anfang. Obwohl die Wechselwirkungen zwischen Vulkanentgasungen und Atmosphäre also noch nicht in allen Einzelheiten verstanden sind, haben wir parallel bereits mit Langzeitmessungen der von Vulkanen emittierten Gase begonnen. Untersuchungen auf eventuelle Zusammenhänge mit vulkanischen Aktivitäten ergaben erste Hinweise, dass wir von der Ausgasung von Brom auf die Dynamik im Innern des Vulkans schließen können.

Telegramme aus dem Innern der Erde

Schon seit einigen Jahrzehnten beschäftigen sich Geologen damit, Ausgasungen der Vulkane als „Telegramme“ aus dem Innern der Erde zu lesen und sie als Frühwarnsystem vor Vulkanausbrüchen zu nutzen. Ein Beispiel dafür, was Frühwarnsysteme bewirken können, ist der Ausbruch des Pinatubo auf den Philippinen: Wochen bevor der Vulkan im

Jahr 1991 letztmals ausbrach – eine der gewaltigsten Eruptionen im 20. Jahrhundert – wurden ansteigende Ausgasungen von Schwefeldioxid (SO_2) gemessen. Das ermöglichte es, Zehntausende von Menschen rechtzeitig zu evakuieren.

Doch nicht allein die Menge an Vulkangasen ist entscheidend; wichtig ist auch deren chemische Zusammensetzung. Untersuchungen zeigen, dass nicht alle Gase unter den gleichen Bedingungen aus den Vulkanen austreten: Die Halogene Chlor und Fluor etwa sind im Magma deutlich löslicher als Schwefeldioxid; Schwefeldioxid wiederum ist deutlich besser löslich als Kohlendioxid. In großer Tiefe und bei hohem äußerem Druck wird als erstes Gas Kohlendioxid freigesetzt. Wenn das Magma weiter Richtung Erdoberfläche aufsteigt und der äußere Druck abnimmt, wird hauptsächlich Schwefeldioxid frei. Gelangt das Magma noch näher an die Erdoberfläche, kann – bei nun niedrigerem äußerem Druck – schließlich Chlor in größerer Menge entweichen. Dieses einfache Modell (siehe Abbildung 1 auf Seite 69) ist nur unter speziellen Bedingungen gültig. Es illustriert jedoch, was uns die Zusammensetzung der Gase über die Vorgänge im Erdinneren sagen kann.

Weltumspannende Vulkanbeobachtungen

Die neuen Verfahren erlauben es auch, Messungen während explosiver Phasen der Vulkane vorzunehmen. Das Heidelberger Institut für Umweltphysik war in den Jahren von 2005 bis 2010 an einem Projekt zum Aufbau eines globalen „DOAS-Netzwerkes“ an Vulkanen beteiligt. Dazu wurden weltweit an über zwanzig Vulkanen DOAS-Geräte installiert. Ein erstes Ziel war es, die Schwefeldioxid-Flüsse zu bestimmen, um sie für Vulkanbeobachtungen nutzen zu können. Dieses Ziel konnte rasch erreicht werden: Erhöhte Schwefeldioxid-Flüsse machten beispielsweise im Herbst 2009 auf Vulcano Island in Italien auf eine spontane Druckabnahme im Magmasystem aufmerksam. Inzwischen erlauben es technische Weiterentwicklungen, das vom Vulkan ausgestoßene Schwefeldioxid auch zweidimensional zu erfassen (siehe Abbildung 2 auf Seite 69).

Allein kann der Schwefeldioxid-Fluss jedoch nicht immer eindeutig auf einen drohenden Vulkanausbruch hinweisen: Ein verstopfter Schlot oder ein sich mit Wasser füllender Krater führen unter Umständen zu geringeren Schwefeldioxid-Emissionen – selbst dann, wenn der Druck von unten groß ist. Auch die Geschwindigkeit, mit der das Magma vom Innern der Erde auf die Oberfläche drückt, lässt sich erst abschätzen, nimmt man weitere Gaskomponenten hinzu. Das von Vulkanen in großen Mengen entgaste Kohlendioxid wäre ein guter Kandidat dafür. Allerdings ist es mit den herkömmlichen Fernerkundungsmethoden nur schwierig zu bestimmen. Brommonoxid tritt zwar zu wesentlich geringeren Teilen in der Vulkanfahne auf, lässt sich dafür aber sehr gut und eindeutig messen. Es könnte sich deshalb künftig als hilfreicher zusätzlicher Parameter erweisen.

Aufschlussreiche Messungen am Ätna

Über drei Jahre lang haben wir am Ätna wöchentlich das Verhältnis von Brommonoxid und Schwefeldioxid gemessen – und tatsächlich ließen sich damit Änderungen feststellen, die mit der Aktivität des Vulkans in Verbindung gebracht werden können. Zwei ausgedehntere Eruptionen des Ätna fanden in dieser Zeit statt: Zwei bis drei Monate vor jeder explosiven Phase stieg das Verhältnis von Brommonoxid und Schwefeldioxid auf ein Maximum an, um bis zum Eruptionsbeginn wieder zu sinken.

Aus diesen Beobachtungen haben wir ein erstes empirisches Modell zur Ausgasung von Brommonoxid abgeleitet; es wurde Ende des vergangenen Jahres 2012 in der Fachpresse veröffentlicht. Das Modell geht davon aus, dass Brom – ähnlich wie Kohlendioxid – entgast, wenn Magma aus größerer Tiefe aufsteigt. Gelangt das Magma weiter nach oben, wird zunehmend auch Schwefeldioxid frei, und das zunächst ansteigende BrO/SO_2 -Verhältnis beginnt zu sinken.

Diese Zusammenhänge sind bislang nur Theorie – die allerdings mit den tatsächlichen Beobachtungen gut in Einklang zu bringen ist. Weitere Belege sind Messungen, die wir in jüngerer Zeit am Vulkan Nyiragongo in der Demokratischen Republik Kongo vorgenommen haben. Viermal schon haben wir den Nyiragongo besucht: im Juni 2007, im Juli 2010, im Juni 2011 und im Dezember 2011. Bei jedem Aufenthalt erfolgten für circa eine Woche tägliche Messungen am Kraterand. Stieg das Magma nach oben oder sank es ab, zeigte sich ein ähnliches Verhalten in dem Verhältnis von Brommonoxid und Schwefeldioxid, wie wir es am Ätna beobachtet haben.

Nun arbeiten wir daran, unseren empirischen Ansatz auf eine breitere Datenbasis zu stellen. Hierzu analysieren wir die Daten, die das globale DOAS-Netzwerk sammelt, nicht mehr nur – wie bislang üblich – auf Schwefeldioxid, sondern auch auf Spurenstoffe wie Brommonoxid. Da wir noch immer weit davon entfernt sind, in das Innere der Erde vorzustoßen, werden wir wohl noch eine ganze Weile auf die Betrachtung des „Himmels“ angewiesen sein, um „die Hölle“ unter der Erdoberfläche zu erkunden. ●

WATCHING THE HEAVENS TO UNDERSTAND HELL

TELEGRAMS FROM THE EARTH'S CORE

NICOLE BOBROWSKI & ULRICH PLATT

In 1864, French author Jules Verne described a journey to the centre of the Earth. In reality, scientists have not yet managed to reach the mysterious core of our planet. Instead, we have to settle for indirect signs of what goes on deep beneath the surface. One such sign are gases that are released by volcanoes – the gateway to the Earth's interior. For the past 10 years, the gas emissions of volcanoes have been a focus of research at Heidelberg University's Institute of Environmental Physics. We want to understand how volcanic gases influence our atmosphere and learn about the processes that take place in the Earth's core. So in a way, we study the heavens to understand hell – using tools that we have developed ourselves.

More than three decades ago, scientists of the Heidelberg Institute of Environmental Physics helped develop the process of differential optical absorption spectroscopy (DOAS), a method that allows researchers to identify molecules in the Earth's atmosphere based on the wavelengths of absorbed light. Changes in the light's intensity indicate the concentration of the molecules. Today, miniature spectrographs and measuring geometries – especially the multi-axial differential optical absorption spectroscopy system (MAX-DOAS) that was also developed in Heidelberg – enable us to systematically “scan” the sky. These new methods also permit measurements during the explosive phases of volcanoes.

The analysis of volcanic gas emissions could provide us with an early warning system for volcano eruptions, among other things. Increased sulphur dioxide emissions, for instance, signal an impending eruption. The trace gas bromine monoxide is another indicator that could be used for a more accurate warning system. With the help of the tools developed in Heidelberg, we have discovered that variations in trace gas emissions seem to correlate with the dynamics in the volcanoes core. ●

PROF. DR. ULRICH PLATT was appointed professor of experimental physics at Heidelberg University in 1989. Before his transfer to Heidelberg, he worked for several years at the Institute for Atmospheric Chemistry of the Research Center Jülich and at the Statewide Air Pollution Research Center of UC Riverside, USA. He earned his habilitation in geophysics in 1984 at the University of Cologne. In 1990, Ulrich Platt became director of the Heidelberg Institute of Environmental Physics, where he directs numerous research projects designed to improve our understanding of the physical aspects of our environment. He was a major contributor to the development of the differential optical absorption spectroscopy method (DOAS).

Contact: ulrich.platt@iup.uni-heidelberg.de

DR. NICOLE BOBROWSKI received her doctorate in 2005 at Heidelberg University. She spent the next three years at the National Institute of Volcanology and Geophysics in Palermo, Italy, before accepting a position as research assistant at Heidelberg University's Institute of Environmental Physics in 2009. Her scientific work focuses on the halogen chemistry of volcanic gases.

Contact: nicole.bobrowski@iup.uni-heidelberg.de

“Weeks before the 1991 eruption of the Pinatubo in the Philippines, scientists registered increased sulphur dioxide emissions. These measurements helped evacuate tens of thousands of people in time.”