

HEIDELBERGER  
JAHRBÜCHER  
ONLINE  
Band 7 (2022)

Gesellschaft der Freunde  
Universität Heidelberg e.V.



# Die vier Elemente

Joachim Funke & Michael Wink (Hrsg.)

HEIDELBERG  
UNIVERSITY PUBLISHING

# Auf den Spuren des Empedokles

JONAS KUHN, NICOLE BOBROWSKI & ULRICH PLATT

Institut für Umweltp Physik der Universität Heidelberg

## Zusammenfassung

Nirgendwo sonst auf der Erde sind sich die vier Elemente so nahe wie bei Vulkanen. Wenn heiße Magma aus der Tiefe der Erde aufsteigt gibt sie große Mengen von Gas, hauptsächlich Wasserdampf, ab. Sobald diese Gase an der Erdoberfläche mit Luft in Berührung kommen laufen komplexe chemische Reaktionen ab. So bildet etwa die Reaktion von magmatischem Wasserdampf mit Sauerstoff aus der Luft reaktive Molekülbruchstücke (Radikale), die im Bruchteil einer Sekunde reduzierte Bestandteile der Gasemission verbrennen. Empedokles, der Begründer der Lehre der vier Elemente, starb der Legende nach am Vulkan Ätna, als er in den Krater stieg, um das Vulkaninnere zu verstehen. Nach wie vor ist die Forschung an Vulkanen mit großen Herausforderungen verbunden: giftige Gase, hohe Vulkangipfel, sprudelnde Lava. Moderne Fernerkundungsverfahren erlauben mittlerweile die Beobachtung von chemischen Abläufen in Vulkangasen aus (halbwegs) sicherer Entfernung. Erkenntnisse daraus helfen Vulkane und unseren Planeten im Allgemeinen besser zu verstehen und bilden damit auch die Grundlage neuer Möglichkeiten Ausbrüche vorherzusagen.

## 1 Einleitung

Die vier Elemente – Feuer, Wasser, Luft und Erde – aus denen nach Empedokles alles Irdische besteht, stehen nirgendwo so eng miteinander in Wechselwirkung wie bei Vulkanen. Wenn 1000 Grad heiße Magma aus der Tiefe der Erde aufsteigt gibt sie große Mengen von Gas an die umgebende Luft ab. Dieses Gas besteht zu etwa vier Fünfteln aus Wasserdampf, welcher dann durch Kondensation Tröpfchen

bildet und zu den mit bloßem Auge sichtbaren Vulkanfahnen in der Atmosphäre führt. Das Feuer der Vulkane entsteht allerdings nur zu einem geringen (aber manchmal nicht zu vernachlässigendem) Teil durch chemische Verbrennung, sondern ist ein Ausbruch der Hitze im Inneren unserer Erde. Diese Hitze ist einerseits ein Überbleibsel der Erdentstehung vor etwa 4.5 Milliarden Jahren, andererseits und wie man vermutet zum größeren Teil, wird sie durch den Zerfall radioaktiver Spurenelemente (vor allem Uran und Thorium) im Erdinneren erzeugt.

Neben dem Wasserdampf sind andere Gase wie Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>), Schwefeldioxid (SO<sub>2</sub>) und Halogenverbindungen meist wichtiger für die Auswirkungen vulkanischer Aktivität (siehe z. B. Schmincke, 2014). Der CO<sub>2</sub>-Ausstoß aller Vulkane zusammen entspricht heutzutage zwar nur 1–2% des anthropogenen CO<sub>2</sub>-Ausstoßes, aber auf lange Sicht (hunderttausende von Jahren) verhindert diese Emission, dass der gesamte verfügbare Kohlenstoff und damit die Basis des Lebens auf der Erde im Sediment verschwindet. Seit der Zeit des Homo Heidelbergensis (vor ca. 600.000 Jahren) ist z. B. die weltweit an der Oberfläche und im Ozean verfügbare Kohlenstoffmenge schon etwa drei Mal im Sediment verschwunden und durch Vulkane wieder freigesetzt worden.

Auf noch längeren Zeitskalen verlief die Entstehung der Erdatmosphäre – also unserer Luft – vor Milliarden von Jahren, an der Vulkane ebenfalls beteiligt waren. Die Wasserstoffatome der von Vulkanen emittierten Wasserstoffmoleküle verlassen nach und nach die Erdatmosphäre in Richtung Weltraum. So gibt es Theorien die besagen, dass dieser Vorgang noch vor der Bildung von Sauerstoff durch Photosynthese zu einer (sehr langsamen) Oxidation der gesamten Erde, hauptsächlich aber der Atmosphäre, führte (siehe z. B. Holland, 2002). Durch den so erlangten (zunächst geringen) Sauerstoffgehalt könnte das Leben in seiner heutigen Form ermöglicht worden sein.

## **2 Der Eintrag heißer Vulkangase in die Atmosphäre**

Am anderen Ende der Zeitskala liegen sehr dynamische Prozesse, die direkt mit der Emission von Vulkangasen in die Atmosphäre zusammenhängen. Die Schnittstellen zwischen Magma und Atmosphäre, die die Gase passieren müssen (also die Gasemissionswege) sind vielfältig und hängen in erster Linie von der Struktur und der Art des vulkanischen Systems ab (siehe Abbildung 1).

Diese Emissionspfade können die Gaszusammensetzung bedeutend verändern und ‚verschlüsseln‘ dadurch die Information, die diese Gase über Prozesse im Erdinneren tragen. Zum Beispiel gibt es Gasemissionen vom Meeresboden oder in Kraterseen, bei denen die Signatur der aus der Magma stammenden Gase durch die Wechselwirkung im Wasser abgewandelt wird. In anderen Fällen wandern magmatische Gase oft über beträchtliche Entfernungen im Untergrund, z. B. in Schlotssystemen, Klüften oder porösem Boden. Dort verändern Wechselwirkungen



**Abbildung 1:** Die Photos zeigen eine Reihe von Beispielen für die vielgestaltigen vulkanischen Gasemissionstypen. Bild (a): Explosive Entgasung, Bilder (b)-(f): „stille“ Entgasung aus Vulkanschlot (b), Lavasee (c), Spalte mit Flammen (d), Fumarole (e) und aus einem Kratersee (f).

mit dem Wirtsgestein oder hydrothermalen Systemen (also der Kontakt mit erhitztem Grundwasser) die Gaszusammensetzung, bevor sie z. B. über Schloten, so genannte Fumarole oder diffusive Ausgasung durch den Boden in die Atmosphäre gelangen. Die Untersuchung von Gas-Gestein- und Gas-Fluid-Wechselwirkungen ermöglicht die kombinierte Untersuchung von Entgasungswegen und Tiefenprozessen anhand von Messungen der Gaszusammensetzung an Fumarolen (siehe z. B. Giggenbach, 1996).

Vulkane mit offenen Schloten sind für einen großen Teil der globalen vulkanischen Gasemissionen verantwortlich. Dort, zum Beispiel an Lavaseen, werden magmatische Gase direkt in die Atmosphäre emittiert. Der Einfluss von solchen Emissionspfaden auf die Gaszusammensetzung ist weit weniger offensichtlich und – aufgrund der extremen Bedingungen – gleichzeitig bedeutend schwerer zu untersuchen. Daher wird ihre Diskussion in der Vulkangasforschung oft vermieden.

Wenn die heißen magmatischen Gase mit der Atmosphäre in Berührung kommen, spielt sich ein hochdynamischer Prozess ab: Der Sauerstoffgehalt im emittierten Vulkangas steigt und initiiert schnell ablaufende Kettenreaktionen, wobei reduzierte Gasbestandteile (wie etwa Kohlenmonoxid oder Schwefelwasserstoff) schnell umgewandelt (verbrannt) werden. Gleichzeitig sinkt – durch Einmischung der vergleichsweise kalten Luft – die Temperatur dramatisch, was zur Verlangsamung der ausschlaggebenden chemischen Reaktionen führt und die Gaszusammensetzung in ihrem momentanen Zustand ‚einfriert‘. Diese Prozesse laufen innerhalb von Bruchteilen einer Sekunde ab und können die ursprüngliche magmatische Gaszusammensetzung ganz erheblich verändern. Weiterhin wird angenommen, dass diese Veränderungen und dabei entstehende reaktive Molekülbruchstücke (Radikale) für die spätere (etwas langsamere) chemische Entwicklung von Vulkanfahnen ausschlaggebend sind und somit den weitläufigeren Einfluss von Vulkangasen auf die Atmosphäre prägen.

Der antike griechische Philosoph und Naturforscher Empedokles, welcher als der Begründer der Vier-Elemente-Lehre gilt, starb der Legende nach am Vulkan Ätna auf Sizilien. Einige Quellen behaupten er sei in den Vulkan gestiegen um sein Inneres zu erforschen. Empedokles liefert somit ein tragisches Beispiel für das Risiko das mit der Erforschung von Vulkanen aus nächster Nähe einhergeht. Noch heute sind Feldstudien zu vielen vulkanischen Prozessen mit erheblichen Schwierigkeiten verbunden: giftige Gase, raue Wetterverhältnisse auf den hohen

Vulkangipfeln, sowie sprudelnde Lava. Unsere technischen Möglichkeiten sind nach wie vor recht begrenzt, so ist zum Beispiel kaum ein Material widerstandsfähig genug der korrosiven Umgebung vulkanischer Gasemissionen längere Zeit zu trotzen.

### **3 Licht als Werkzeug für Vulkangasuntersuchungen**

Hier kommen die Erfahrungen unserer Arbeitsgruppe ins Spiel. Optische Fernerkundungsmethoden erlauben die Untersuchung eines Teils der chemischen Abläufe in Vulkangasen aus (halbwegs) sicherer Entfernung. Seit rund zwanzig Jahren ist die Gasemission von Vulkanen ein Forschungsschwerpunkt des Instituts für Umweltphysik der Universität Heidelberg. Wir wollen einerseits verstehen, wie Vulkangase die Atmosphäre beeinflussen. Andererseits wollen wir durch die Analyse der Gase an Informationen über Vorgänge kommen, die sich im Innern der Erde – und damit für die direkte Beobachtung weitgehend unzugänglich – abspielen. Dazu nutzen wir eigens geschaffene Werkzeuge die auf den Prinzipien der Spektralanalyse beruhen.

Dieses um die Mitte des Neunzehnten Jahrhunderts von Kirchhoff und Bunsen zum Teil in Heidelberg entwickelte Verfahren nutzt die charakteristische Emission oder (in unserem Falle) Absorption von Licht durch die Grundbestandteile (also Atome oder Moleküle) aus denen die Gase bestehen. Bunsen war bereits damals schon fasziniert von vulkanischen Phänomenen und unternahm selbst Untersuchungen unter anderem in Island (siehe z. B. Bunsen 1851, Wentrup 2020). Damit gehört er zu den Pionieren der Vulkangasmessungen und kam zu bereits wichtigen Erkenntnissen. Beispielsweise vermaß er die Gaszusammensetzung und deren Abhängigkeit von der Aktivität des Vulkans sowie der zeitlichen Nähe zum letzten Ausbruch. Allerdings beruhten Bunsens Vulkangas-Untersuchungen noch auf rein chemischen Methoden und er näherte sich dem Schauplatz erst nach dem Ende von Vulkanausbrüchen.

Heutzutage nutzen wir nun die Abschwächung des Lichts des Himmels, direkten Sonnenlichts oder das künstlicher Lichtquellen durch die Absorption der Moleküle der oben genannten Vulkangase. Für die unterschiedlichen Moleküle – bestimmt durch ihren Aufbau – ist die Stärke der Absorption charakteristisch über verschiedene Farbtöne (Lichtwellenlängen) verteilt. Dadurch können wir diese identifizieren und deren Menge in der Vulkanfahne – auch bei erhöhter Akti-

vität mit sicherem Abstand – bestimmen. Bunsen selbst hätte diese Verbindung von Spektralanalyse mit der Erforschung vulkanologischer Prozesse wohl sehr gefallen.

Mittlerweile werden im Vergleich zu den Zeiten von Bunsen und Kirchhoff wesentlich verfeinerte Verfahren der Spektralanalyse verwendet. Wir stützen uns auf das an unserem Institut maßgeblich entwickelte Verfahren der Differentiellen Optischen Absorptions-Spektroskopie (kurz DOAS, siehe z. B. Platt und Stutz, 2008). Dieses Verfahren wird am Vulkan mit Miniaturspektrographen und speziellen Messgeometrien umgesetzt. Es werden mit Hilfe eines motorisierten schwenkbaren Teleskops verschiedene Punkte im Himmel abgetastet (siehe auch Abbildung 2b), was den Abgleich der Absorption der Vulkanfahne mit der des freien Himmels ermöglicht. Ähnliche Verfahren werden auch von Satelliten aus angewandt, was globale Beobachtungen von Vulkanemissionen erlaubt.

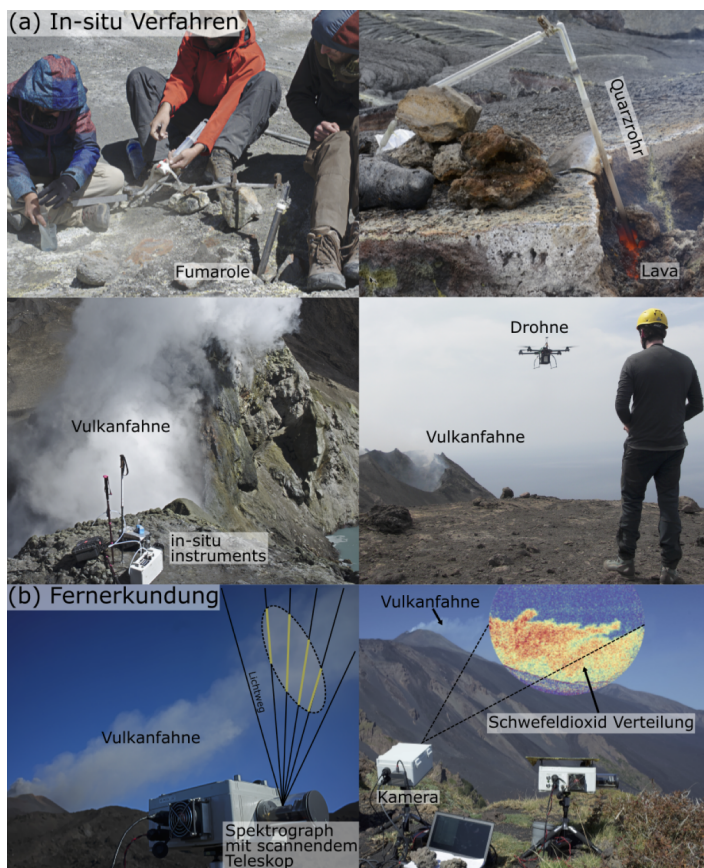
Allerdings lassen sich die Hauptbestandteile der Vulkangase, also Wasserdampf und CO<sub>2</sub> mit diesen Methoden der Absorptionsspektroskopie nur schlecht messen. Dies liegt daran, dass diese beiden Gase in der Atmosphäre schon in vergleichsweise hoher Konzentration vorkommen. Zwar enthält eine Vulkanfahne in der Regel eine – im Vergleich zur restlichen Atmosphäre – um ein vielfaches erhöhte Konzentration an Wasserdampf und CO<sub>2</sub>, aber sie macht am gesamten vom Boden oder vom Weltraum betrachteten Lichtweg durch die Atmosphäre nur einen kleinen Teil aus. Daher ist ihr Kontrast zur Umgebung sehr gering und mit heutigen Fernerkundungsmethoden nur sehr aufwändig zu bestimmen.

Ganz anders sieht es bei einer Reihe von Spurengasen aus, z. B. bei SO<sub>2</sub>. Hier liegt die Konzentration in der Vulkanfahne typischerweise 10,000 bis Millionen Mal höher als in der umgebenden Luft, so dass der Kontrast zur Umgebung sehr hoch wird und die Absorption eindeutig dem Vulkangas zuzuordnen ist.

Ein anderer Aspekt der Messungen ist die räumliche und zeitliche Auflösung. Zwar kann das DOAS Verfahren mit hoher Empfindlichkeit die Gasmenge an einem Punkt der Fahne bestimmen, es dauert allerdings oft zu lange einen bedeutenden Teil der Fahne damit abzutasten (etwa für die Bestimmung der Gesamtemissionsrate der Gase). Für SO<sub>2</sub> wurde hier eine Lösung gefunden die auf der (häufig zutreffenden) Annahme beruht, dass SO<sub>2</sub> im ultravioletten (UV-B) Spektralbereich mit Abstand der stärkste Absorber ist. Es genügt also eine UV-empfindliche Kamera, bei der ein passendes Filter, welches Strahlung nur im entsprechenden Spektralbereich durchlässt, vor dem Objektiv angebracht wird. Im

aufgenommenen Bild kann nun die gemessene Lichtintensität in der Vulkanfahne mit der des freien Himmels verglichen und daraus die  $\text{SO}_2$ -Menge an jedem Punkt in der Fahne errechnet werden (Abbildung 2b). Mit derartigen ‚ $\text{SO}_2$ -Kameras‘ können nun sogar Filme der  $\text{SO}_2$ -Emission von Vulkanen aufgenommen werden.

Nachteile des an sich sehr eleganten Verfahrens sind die vergleichsweise geringe Genauigkeit und die mögliche Störung durch Wassertröpfchen und ‚Vulkanasche‘ (bei der Emission zerstäubte Lava) in der Fahne, welche auch Strahlung absorbieren und somit  $\text{SO}_2$  vortäuschen können. Diese Einflüsse lassen sich bei solchen



**Abbildung 2:** Beispiele für die Messung von Vulkangasen mit verschiedenen Methoden. Verwendet werden einerseits so genannte in-situ Verfahren (a) oder Fernerkundungsverfahren (b).

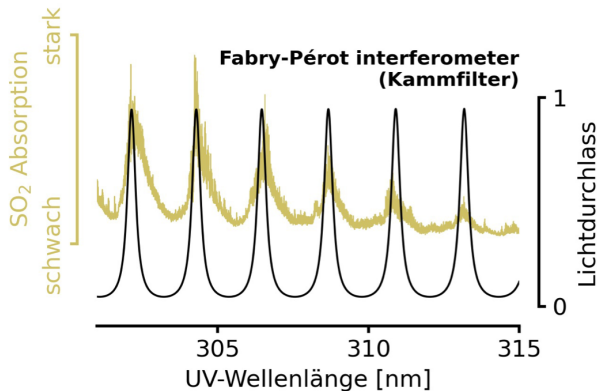


SO<sub>2</sub>-Kameras kaum korrigieren, was letztendlich dazu führt, dass diese nur an starken SO<sub>2</sub>-Emittlern (also nur an wenigen Vulkanen) eingesetzt werden können.

#### 4 ‚Farbkämme‘ können Vulkangasmessungen erheblich verbessern

Um diesen Problemen abzuweichen haben wir in Heidelberg ein neues Verfahren entwickelt das auf Interferometrie beruht. Dabei nutzen wir ähnlich wie beim DOAS Verfahren Details des Absorptionsspektrums, also die charakteristische Verteilung der Molekülabsorption auf die unterschiedlichen Farbtöne (Wellenlängen) aus. Für viele Gase ändert sich die Absorption mit der Wellenlänge periodisch: Bei einer bestimmten Wellenlänge ist die Absorption stark, geht man einen Schritt weiter zu nächst längeren Wellenlänge, so wird sie wieder schwächer, beim nächsten Schritt wieder stärker, usw. (siehe Abbildung 3). Dies ist eine wohlbekannte Folge quantenmechanischer Effekte im Molekül.

Nun verwenden wir anstelle des Filters in der SO<sub>2</sub>-Kamera ein so genanntes „Fabry-Pérot Interferometer“ (benannt nach den französischen Physikern Charles Fabry und Alfred Pérot, die die Vorrichtung 1897 erstmals umgesetzt haben). Das Instrument ist denkbar einfach aufgebaut, es besteht lediglich aus zwei parallelen Glasplatten. Das Geheimnis ist, dass diese Platten außerordentlich genau



**Abbildung 3:** Die Durchlasskurve des Fabry-Pérot Interferometers stellt einen Kammfilter dar dessen Periode (Abstand zwischen den Durchlassmaxima) genau auf die Absorptionsmaxima des messenden Moleküls (in diesem Beispiel SO<sub>2</sub>) eingestellt wird.

plan geschliffen sind, etwa auf einen hunderttausendstel Millimeter, und ebenso genau parallel ausgerichtet. Dann hat das Instrument einen periodischen Durchlass welcher in seiner Verteilung über die Farbtöne einem Kamm gleicht. Das heißt, bei einer bestimmten Wellenlänge lässt es viel Licht durch, geht man einen Schritt weiter zu längerer Wellenlänge, lässt es kaum noch Licht durch, dann wird es wieder durchlässig, usw. Das Instrument wird nun so eingestellt, dass seine Durchlassperiode genau auf die des zu messenden Gases abgestimmt ist (siehe Abbildung 3). Damit lassen sich Gasverteilungen viel empfindlicher messen als mit der  $\text{SO}_2$ -Kamera und die Beeinflussung durch Vulkanasche wird weitgehend eliminiert. Außerdem funktioniert diese Methode nicht nur für  $\text{SO}_2$ , sondern im Prinzip für alle Gase mit periodischer Absorption (siehe z. B. Kuhn et al. 2019).

Erste Prototypen solcher Instrumente wurden von uns am Institut für Umweltphysik entwickelt und gebaut. In den letzten Jahren konnten wir sie am Ätna ausgiebig testen, weiterentwickeln und erste  $\text{SO}_2$ -Emissions Filme sowie Bilder von Brommonoxid ( $\text{BrO}$ , einem reaktiveren Molekül) in der Vulkanfahne aufnehmen (Fuchs et al., 2021).

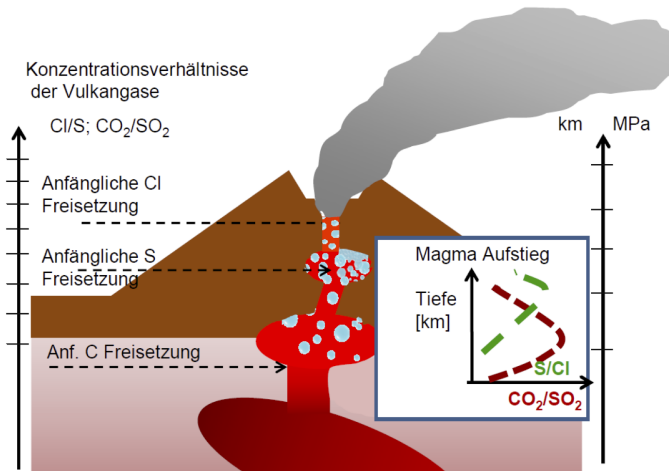
Neben der Gasmenge in Vulkanfahnen ist nämlich besonders deren chemische Zusammensetzung sehr aufschlussreich. Dazu stelle man sich das Innere eines Vulkans vor (etwa wie in Abbildung 4). Nicht alle Gase treten unter den gleichen Bedingungen aus dem Magma aus: Etwa sind Halogene (etwa Fluor, Chlor und Brom) in Magma deutlich löslicher als Schwefeldioxid; Schwefeldioxid wiederum ist deutlich besser löslich als Kohlendioxid. Das hat zur Folge, dass in großer Tiefe und somit bei hohem Druck als erstes Gas Kohlendioxid die Magma als Gas verlassen kann. Wenn Magma weiter in Richtung Erdoberfläche aufsteigt und der äußere Druck dadurch abnimmt, wird als nächstes Schwefeldioxid und dann – bei noch niedrigerem äußeren Druck – die Halogene in größerer Menge freigesetzt. Der resultierende Zusammenhang von Entgasungstiefe und der Gaszusammensetzung (siehe Abbildung 4) erlaubt letztendlich den Rückschluss von Gasmessungen in der Vulkanfahne auf dynamische magmatische Prozesse. Solche Entgasungsmodelle sind oft sehr vulkanspezifisch und sollten unter Einbeziehung möglichst vieler anderer Beobachtungsparameter (etwa seismischen Messungen) angewandt werden.  $\text{BrO}$  und  $\text{SO}_2$  können mittlerweile mit Hilfe automatisierter Messstationen an vielen Vulkanen gleichzeitig und kontinuierlich gemessen werden. Unsere neuen Kamerasysteme helfen dabei das chemische Verhalten des reaktiveren  $\text{BrO}$  Moleküls in der Vulkanfahne besser zu untersuchen. Damit

versuchen wir die Interpretierbarkeit von BrO Messungen im vulkanologischen Zusammenhang zu verbessern und auch den Einfluss von Bromchemie auf die Atmosphäre besser zu verstehen.

## 5 Das gut bewachte Geheimnis heißer Vulkangase

Ein wichtiges Forschungsgebiet unserer Arbeitsgruppe ist auch die Untersuchung der oben beschriebenen chemischen Reaktionen, welche während der ersten Sekunden nach der heißen Gasemission in die Atmosphäre stattfinden. Was da geschieht wurde von Friedrich Schiller schon in der Ballade „der Taucher“ anschaulich beschrieben: „... Und es wallet und siedet und brauset und zischt, Wie wenn Wasser mit Feuer sich mengt, Bis zum Himmel sprühtet der dampfende Gischt, ...“.

Diese Vorgänge versuchen wir quantitativ zu beschreiben und verwenden dazu Erkenntnisse aus der Chemie der Verbrennung. Dort sind schon viele Reaktio-



**Abbildung 4:** In großer Tiefe und somit bei hohem Druck wird daher als erstes Gas Kohlendioxid freigesetzt. Wenn Magma weiter in Richtung Erdoberfläche aufsteigt und der äußere Druck dadurch abnimmt, wird Schwefeldioxid und dann – bei niedrigem äußeren Druck – Chlor (und Fluor) in größerer Menge frei.

nen die Wasser, kohlenstoff- und schwefelhaltige Gase einschließen bekannt. Allerdings unterscheiden sich diese Verbrennungsvorgänge, bei denen meist Kohlenwasserstoffe (z. B. Erdgas) verbrannt werden, noch erheblich von den Prozessen an Vulkanen, wo kaum Kohlenwasserstoffe vorliegen. Um die einzigartige Chemie heißer Vulkangase besser zu untersuchen bedarf es Messungen am Vulkan, um damit die bisherigen Rechnungen und vorherrschenden Theorien zu bestätigen.

Heiße Vulkangase sind nur an sehr wenigen Stellen auf der Erde beobachtbar. An Lavaseen oder Lavaflüssen treten diese direkt aus dem flüssigen Gestein (Abbildung 1c). Vulkane mit derartiger Aktivität verändern allerdings ständig ihr äußeres Erscheinungsbild, sodass es für Messungen nur bestimmte, unvorhersehbare Zeitfenster (etwa von Jahren bis wenigen Tagen) gibt. Dies erfordert ein hohes Maß an Flexibilität und Improvisationsfähigkeit. Zugleich drängt sich aber auch das Bild von Empedokles' Schicksal in den Vordergrund.

Im Februar 2020 konnten wir ein solches Zeitfenster am Nyiragongo in der Demokratischen Republik Kongo nutzen (Abbildung 5 zeigt einige Impressio-



**Abbildung 5:** Eindrücke zur Messkampagne am Nyiragongo im Februar 2020.

nen dieser Expedition). Unser Ziel war zu bewerten ob die Quantifizierung von Hydroxyl-Radikalen (OH) in heißen vulkanischen Emissionen prinzipiell umsetzbar ist. Viele Chemiemodelle erwarten darin außergewöhnlich große Mengen an OH, welche durch ihre hohe Reaktivität maßgebliche Auswirkungen auf die Gaszusammensetzung hätten. Zu dieser Zeit beherbergte der Nyiragongo den größten von etwa fünf aktiven Lavaseen auf der Erde. Der Kraterboden, also die Ebene auf der sich der Lavasee und einige Lavaflüsse befinden, lag zu dieser Zeit etwa 300 m unter der Höhe des Kraterandes, der sich auf etwa 3470 m ü. M. befindet.

Am Institut für Umweltphysik entwickelten wir eigens für diese Messung ein mobiles DOAS Messsystem für OH-Radikale. Der gesamte Messaufbau wiegt etwa 20 kg und passt gerade noch in einen Rucksack. Damit kletterten wir die Kraterwände hinunter bis zum Kraterboden. Das Licht einer LED wurde dort mit einem kompakten Teleskop gebündelt, durch die heißen Entgasungen eines Lavaflusses geschickt und daraufhin mit einem neuartigen hochauflösenden Spektrographen (Kuhn et al., 2021) vermessen. Mit dieser bisher beispiellosen Messung konnten erste Nachweisgrenzen bestimmt werden und wichtige Erfahrungen für die Durchführung zukünftiger Messungen gesammelt werden.

Im Mai 2021 schloss sich dann tatsächlich das besagte Zeitfenster durch den Ausbruch des Nyiragongo, welcher bedrohlich über der Millionenstadt Goma liegt. Im Gegensatz zur tragischen Eruption im Jahre 2002 bei der die Lava durch die Stadt Goma in den Kivu-See floss, kam man diesmal größtenteils mit dem Schrecken davon. Die Lava stoppte kurz vor der Stadt. Allerdings veränderte sich die Kraterregion allumfassend und der Lavasee verschwand, fürs erste.

Man sieht an diesem Beispiel, dass auch nach über 150 Jahren der Forschung, grundlegendes Wissen über unseren Planeten, sozusagen gut gehütet, im Verborgenen bleibt. Für Menschen die in der direkten Umgebung von Vulkanen leben kann dieses Wissen von großer Bedeutung sein. Darüber hinaus ist es auch entscheidend für das Verständnis unseres Planeten, welches, mit zunehmender anthropogener Einflussnahme, immer wichtiger wird.

## Referenzen

Bunsen, Robert (1851), Über die Prozesse der vulkanischen Gesteinsbildung Islands, *Poggendorff's Annalen der Physik und Chemie, Band 83, No. 6, 197–272.*

- Fuchs, C., Kuhn, J., Bobrowski, N., and Platt, U. (2021), Quantitative imaging of volcanic SO<sub>2</sub> plumes using Fabry-Perot interferometer correlation spectroscopy, *Atmospheric Measurement Techniques*, 14, 295307, <https://doi.org/10.5194/amt-14-295-2021>.
- Giggenbach, Werner F. (1996), Chemical Composition of Volcanic Gases, in: *Monitoring and Mitigation of Volcano Hazards*, pp. 221–256, Springer Berlin Heidelberg, <https://doi.org/10.1007/978-3-642-80087-0>.
- Holland, Heinrich D. (2002), Volcanic gases, black smokers, and the great oxidation event, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 66, 3811–3826, [https://doi.org/10.1016/s0016-7037\(02\)00950-x](https://doi.org/10.1016/s0016-7037(02)00950-x).
- Kuhn, Jonas; Platt, Ulrich; Bobrowski, Nicole; Wagner, Thomas (2019), Towards imaging of atmospheric trace gases using Fabry Perot Interferometer Correlation Spectroscopy in the UV/Vis spectral range, *Atmos. Meas. Tech.*, 12, 735–747, <https://doi.org/10.5194/amt-12-735-2019>.
- Kuhn, Jonas; Bobrowski, Nicole; Wagner, Thomas; and Platt, Ulrich (2021), Mobile and high spectral resolution Fabry-Perot interferometer spectrograph for atmospheric remote sensing, *Atmos. Meas. Tech.*, 14, 7873–7892, doi: <https://doi.org/10.5194/amt-14-7873-2021>.
- Platt, Ulrich and Stutz, Jochen (2008), *Differential Optical Absorption Spectroscopy, Principles and Applications*, XV, Springer, Heidelberg, 597 pp, ISBN 978-3-540-21193-8.
- Schmincke, Hans-Ulrich (2014), *Vulkanismus*, Primus Verlag, 4. Aufl., 264 pp, ISBN 978-3-86312-944-6.
- Wentrup, Curt (2020), Bunsen, der Geochemiker: Isländische Vulkane, Geysirtheorie sowie Gas-, Gesteins- und Mineralienanalysen, *Angew. Chem.*, 132, <https://doi.org/10.1002/ange.202008727>.

## Über die Autor:innen

Dr. **Jonas Kuhn** konzipiert und entwickelt seit 2012 am Institut für Umweltphysik in Heidelberg, sowie am Max-Planck-Institut für Chemie in Mainz neue Fernerkundungsmethoden für vulkanische (und andere) Spurengase in der Erdatmosphäre. Weiterhin arbeitet er an der Modellierung chemischer Prozesse, die bei der Mischung heißer magmatischer Gase mit atmosphärischer Luft stattfinden. Er wurde im Mai 2022 an der Universität Heidelberg promoviert. – Kontakt: [Jonas.Kuhn@iup.uni-heidelberg.de](mailto:Jonas.Kuhn@iup.uni-heidelberg.de)

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 (INGV) in Palermo, Italien. 2009 kehrte sie zunächst nach Heidelberg als wissenschaftliche Mitarbeiterin ans Institut für Umweltphysik der Universität Heidelberg zurück, 2016 ging sie an die Universität in Mainz und 2017 ans MPI-C in Mainz. Sie habilitierte dann 2017 in Vulkanologie in Italien. Kurze Gastprofessur-Aufenthalte führten sie nach Lateinamerika, Uruguay (2012) und El Salvador (2015 und 2017). Seit letztem Jahr arbeitet sie als Wissenschaftlerin am INGV-Observatorium in Catania, Italien, ist aber weiterhin als Gastwissenschaftlerin mit der Universität Heidelberg verbunden. Ihr Forschungsschwerpunkt ist die Halogenchemie in Vulkangasen. – Kontakt: Nicole.Bobrowski@ingv.it

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. Von 1990 bis zu seiner Pensionierung 2015 war Ulrich Platt, Direktor am Heidelberger Institut für Umweltphysik. Er leitete zahlreiche Forschungsprojekte, die sich mit dem Verständnis von Physik und Chemie unserer Atmosphäre befassen. Er entwickelte maßgeblich die Methode der Differentiellen Optischen Absorptions-Spektroskopie (DOAS). – Kontakt: Ulrich.Platt@iup.uni-heidelberg.de

**Korrespondenzadresse:**

Dr. Jonas Kuhn  
Institut für Umweltphysik  
INF 229  
69120 Heidelberg

E-Mail: Jonas.Kuhn@iup.uni-heidelberg.de  
Homepage: <https://www.iup.uni-heidelberg.de/>