

## Frage an ChatGPT: Welche Vulkan-Emissionen beeinflussen die Ozonschicht?

Dr. Bernd Fleischmann, 10.06.2026, www.klima-wahrheiten.de

Ich ordne die Antwort nach Stoffgruppen, weil bei Vulkanen vor allem Halogene, Schwefel-Aerosole und indirekt Wasserstoff-/Stickstoffchemie relevant sind.

Die **ozonrelevanten Vulkanemissionen** sind vor allem diese:

Vulkanische Emission	Einfluss auf Ozonschicht	Mechanismus
<b>SO<sub>2</sub> / Schwefelgase</b>	sehr wichtig, aber indirekt	SO <sub>2</sub> wird in der Stratosphäre zu <b>Sulfat-Aerosolen</b> oxidiert. Diese Aerosole bieten Oberflächen für heterogene Chemie, die Chlor- und Bromverbindungen aktiviert und dadurch Ozonabbau beschleunigen kann. USGS nennt ausdrücklich: stratosphärische Sulfat-Aerosole können die Ozonschicht abbauen. <b>Chlor und Brom</b> zerstören Ozon katalytisch. Brom ist pro Atom meist wirksamer als Chlor. Große explosive Eruptionen können Halogene in oder nahe die Stratosphäre bringen; viele Halogene werden allerdings durch Wasser/Asche in der Eruptionsswolke ausgewaschen, bevor sie die Stratosphäre erreichen. Kutterolf et al. betonen die Rolle von Cl und Br aus großen Eruptionen für katalytische Ozonzerstörung.
<b>HCl, HF, HBr, HI; allgemein Chlor- und Bromverbindungen</b>	potenziell sehr wichtig	In der Stratosphäre kann zusätzlicher Wasserdampf HOx-Chemie beeinflussen und die Bildung polarer Stratosphärenwolken begünstigen. Das ist besonders bei sehr hohen Eruptionen wichtig, etwa Hunga Tonga, wo ungewöhnlich viel Wasserdampf in die Stratosphäre gelangte.
<b>H<sub>2</sub>O / Wasserdampf</b>	indirekt relevant	Wird zu SO <sub>2</sub> /Sulfat oxidiert und wirkt damit ähnlich wie andere Schwefelquellen, allerdings meist weniger direkt relevant als SO <sub>2</sub> .
<b>H<sub>2</sub>S</b>	indirekt relevant	NO <sub>x</sub> kann selbst Ozon katalytisch abbauen, kann aber auch aktives Chlor binden und dadurch unter bestimmten Bedingungen Ozonabbau dämpfen. Die WMO/UNEP-Ozonberichte behandeln NO <sub>x</sub> als Bestandteil katalytischer Ozonchemie.
<b>NO<sub>x</sub> / Stickoxide</b>	zweischneidig	Partikel können Reaktionsoberflächen liefern. Für globale Ozonschicht-Effekte sind Sulfat-Aerosole meist wichtiger, weil sie länger in der Stratosphäre verbleiben.
<b>Asche / Mineralpartikel</b>	meist kurzlebiger, aber chemisch möglich	

Der wichtigste Punkt ist: **Vulkanische SO<sub>2</sub>-Emissionen zerstören Ozon nicht direkt.** Entscheidend ist die Umwandlung zu **stratosphärischen Sulfat-Aerosolen**. Diese Aerosole verändern die chemische Umgebung: Sie fördern heterogene Reaktionen, bei denen relativ inaktive Chlorreservoirs wie HCl und ClONO<sub>2</sub> in photochemisch aktive Chlorverbindungen umgewandelt werden. Sobald Sonnenlicht vorhanden ist, können ClO<sub>x</sub>- und BrO<sub>x</sub>-Zyklen Ozon katalytisch abbauen. WMO beschreibt genau diese Chlor-/Brom-Chemie als zentral für den polaren Ozonabbau.

Bei großen Eruptionen wie **Pinatubo 1991** war daher nicht nur die Schwefelmenge wichtig, sondern auch die Tatsache, dass Material in die **Stratosphäre** gelangte. Troposphärisches SO<sub>2</sub> wird relativ schnell ausgewaschen; stratosphärisches SO<sub>2</sub> kann dagegen über Monate bis Jahre als Sulfat-Aerosol wirksam bleiben. USGS beschreibt die Umwandlung von SO<sub>2</sub> in Schwefelsäure/Sulfat-Aerosole in der Stratosphäre als Hauptmechanismus großer Vulkanausbrüche.

**Chlor und Brom aus Vulkanen** sind chemisch besonders ozonrelevant, aber ihr realer Beitrag hängt stark davon ab, ob sie die Stratosphäre erreichen. Viele Halogenwasserstoffe, vor allem HCl, sind wasserlöslich und werden in der feuchten Eruptionssäule teilweise ausgewaschen. Bei sehr großen, explosiven Eruptionen kann aber dennoch ein signifikanter Anteil in große Höhen gelangen. Deshalb sind Arbeiten zu vulkanischem Cl und Br für die Ozonschicht relevant, besonders bei historischen Großereptionen und Zukunftsszenarien.

Eine interessante Nuance: Der Effekt von Vulkan-Aerosolen auf Ozon ist nicht immer gleich. Unter hoher anthropogener Chlor-/Brombelastung fördern zusätzliche Sulfat-Aerosole eher Ozonabbau. Bei niedriger Halogenbelastung kann sich die Chemie verschieben; einige Modellstudien finden dann regional oder zeitlich auch andere Effekte. Naik et al. formulieren es so, dass erhöhte vulkanische Aerosole unter hoher Halogenbelastung Ozon reduzieren, unter niedriger Halogenbelastung aber in NO<sub>x</sub>-dominierter Chemie auch Ozon erhöhen können.

### Kurz gesagt:

Die wichtigsten vulkanischen Emissionen für die Ozonschicht sind **SO<sub>2</sub>/Schwefelgase**, weil sie langlebige stratosphärische Sulfat-Aerosole bilden, sowie **Chlor- und Bromverbindungen**, weil sie direkt in die katalytische Ozonzerstörung eingehen. **Wasserdampf, H<sub>2</sub>S, NO<sub>x</sub> und Aschepartikel** können zusätzlich eine Rolle spielen, sind aber meist sekundär oder stark ereignisabhängig.

### Welche Vulkane auf der südlichen Hemisphäre stoßen ozonschädigende Gase und Partikel aus?

Ich prüfe dabei zwei Kategorien getrennt: dauerhaft entgasende Vulkane mit Halogenen/SO<sub>2</sub> und explosive Ausbrüche, die Material bis in die Stratosphäre bringen können. Für die Ozonschicht ist diese Höhenreichweite entscheidend.

Auf der Südhalbkugel gibt es mehrere relevante Vulkane. Wichtig ist aber die Unterscheidung: **Fast alle aktiven Vulkane emittieren potenziell ozonrelevante Stoffe:** SO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, HCl, HF, teilweise HBr/BrO, Asche und Sulfat-/Aerosolpartikel. Für die **globale Ozonschicht** werden sie aber erst dann wirklich wichtig, wenn die Stoffe **in die Stratosphäre** gelangen oder dort chemisch wirksame Aerosole bilden. Troposphärische Plumes können lokal Ozon abbauen, beeinflussen aber nicht automatisch die „Ozonschicht“.

### Besonders relevante Vulkane der Südhalbkugel

Vulkan / Region	Lage	Ozonrelevante Emissionen	Bedeutung
<b>Mount Erebus</b>	Antarktis, Ross Island	SO <sub>2</sub> , HCl, HF, Aerosole; vermutlich auch bromhaltige Plume-Chemie	Wichtigster Kandidat direkt im antarktischen Raum. Erebus entgast dauerhaft über einen Lavasee und hat ungewöhnlich hohe Halogen/SO <sub>2</sub> -Verhältnisse. Messungen nennen SO <sub>2</sub> , HCl und HF als Hauptkomponenten; ältere Werte liegen grob bei 7,7–25,9 Gg/Jahr SO <sub>2</sub> , 6,9–13,3 Gg/Jahr HCl und 4–6 Gg/Jahr HF.
<b>Hunga Tonga-Hunga Ha'apai</b>	Tonga, Südwestpazifik	Wasser, SO <sub>2</sub> , Sulfat-Aerosole, Asche; extreme stratosphärische Injektion	Der Ausbruch vom 15. Januar 2022 war für die Stratosphäre außergewöhnlich. NOAA beschreibt die direkte Messung der stratosphärischen Schwefelplume; spätere Auswertungen fanden schnelle Ozonverluste in der tropisch-subtropischen Stratosphäre, getrieben durch HO <sub>x</sub> -/ClO <sub>x</sub> -Chemie und feuchte Aerosole.
<b>Ambrym / Vanuatu</b>	ca. 16°S	SO <sub>2</sub> , HCl, HF, BrO/reaktive Halogene, Sulfat-Aerosole	Einer der klassischen stark entgasenden Vulkane der Südhalbkugel. Ambrym wird in Studien ausdrücklich als Beispiel für Schwefel- und Halogenentgasung sowie reaktive Halogenchemie im Plume behandelt.
<b>Yasur / Vanuatu</b>	ca. 19°S	SO <sub>2</sub> , Halogene, Aerosole	Dauerhaft aktiver offener Schlot; in TROPOMI-/SO <sub>2</sub> -Degassing-Studien als einer der offen entgasenden Vulkane geführt. Für die Ozonschicht eher lokal/troposphärisch relevant, außer bei stärkeren Ausbrüchen.
<b>Whakaari / White Island</b>	Neuseeland, ca. 38°S	SO <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub> , saure Gase, Aerosole	Neuseelands aktivster Kegelvulkan; ältere Messungen fanden SO <sub>2</sub> -Flüsse von 171–900 t/Tag, im Mittel etwa 430 t/Tag. GeoNet überwacht u. a. SO <sub>2</sub> -Emissionen.
<b>Ruapehu / Tongariro / Ngauruhoe</b>	Neuseeland	SO <sub>2</sub> , saure Gase, Asche/Aerosole	Ozonrelevant vor allem bei explosiven Ausbrüchen mit höherer Plume. Für globale Stratosphäreneffekte normalerweise weniger bedeutend als Hunga Tonga oder große Anden-Eruptionen.

Vulkan / Region	Lage	Ozonrelevante Emissionen	Bedeutung
<b>Lascar</b>	Nordchile, ca. 23°S	SO <sub>2</sub> , HCl, HF, Aerosole	Sehr relevantes Beispiel in den Anden: Lascar wurde als signifikanter dauerhafter Emittent von SO <sub>2</sub> , HCl und HF beschrieben, mit SO <sub>2</sub> etwa 150–940 t/Tag, HCl etwa 170–210 t/Tag und HF bis etwa 100 t/Tag.
<b>Villarrica</b>	Chile, ca. 39°S	SO <sub>2</sub> , HCl, HF, Aerosole	Offener Lavasee / dauerhafte Entgasung. Studien nennen SO <sub>2</sub> , HCl und HF als saure Gase im Kraterbereich; Villarrica wird auch in Open-Vent-SO <sub>2</sub> -Studien geführt.
<b>Copahue</b>	Chile/Argentinien, ca. 38°S	SO <sub>2</sub> , saure Gase, Aerosole	Wird von TROPOMI als SO <sub>2</sub> -Quelle erfasst; relevant als regionaler Degassing-Vulkan der südlichen Anden.
<b>Puyehue–Cordón Caulle</b>	Chile, ca. 40°S	SO <sub>2</sub> , Asche, Sulfat-Aerosole	Der Ausbruch 2011 war für Aerosole und Transport auf der Südhalbkugel relevant; bei solchen explosiven Ausbrüchen ist nicht nur die Gasmenge, sondern die Plume-Höhe entscheidend.
<b>Calbuco</b>	Chile, ca. 41°S	SO <sub>2</sub> , Asche, Aerosole	Der Ausbruch 2015 brachte Material in große Höhen; eher episodisch relevant, nicht als permanenter Halogen-SO <sub>2</sub> -Emittent wie Erebus, Ambrym oder Lascar.
<b>Hudson</b>	Chile, ca. 46°S	SO <sub>2</sub> , Asche, Sulfat-Aerosole	Der große Ausbruch 1991 war eine wichtige südhemisphärische SO <sub>2</sub> -/Aerosolquelle, allerdings historisch-episodisch.
<b>South-Sandwich-Inseln, z. B. Saunders/ Mount Michael, Bristol, Montagü</b>	Südatlantik, subantarktisch	SO <sub>2</sub> , Asche, Aerosole	Sehr südliche Vulkanprovinz. Potenziell relevant für südliche Stratosphäre/Polarregion, aber meist weniger gut kontinuierlich gemessen als Erebus oder große Anden-/Tonga-Ereignisse.
<b>Nyamuragira / Nyiragongo</b>	DR Kongo, knapp südlich des Äquators	SO <sub>2</sub> , Halogene/Aerosole	Sehr starke tropische SO <sub>2</sub> -Quellen; formal Südhalbkugel beziehungsweise äquatornah. TROPOMI-Studien führen Nyiragongo/Nyamuragira als offene, stark entgasende Vulkane. Für die antarktische Ozonschicht weniger direkt, für tropische Chemie und Aerosole aber relevant.
<b>Bagana / Manam / Rabaul / Ulawun</b>	Papua-Neuguinea, meist südlich des Äquators	SO <sub>2</sub> , Asche, Aerosole, Halogene	Häufige tropische SO <sub>2</sub> - und Aschequellen. Bei starken explosiven Ausbrüchen können sie die tropische Tropopause-Region oder Stratosphäre erreichen.

## Die wichtigsten Kandidaten, wenn es speziell um die antarktische Ozonschicht geht

Für die **antarktische Ozonschicht** würde ich die Relevanz so gewichten:

- Erebus** — wegen der Lage direkt in Antarktika und dauerhafter Emission von HCl, HF, SO<sub>2</sub> und Aerosolen. Das ist der naheliegendste natürliche Vulkan-Kandidat im polaren Kontext.
- Hunga Tonga 2022** — wegen der extremen stratosphärischen Wasser- und Aerosolinjektion; relevant für die Südhalbkugel insgesamt, aber nicht als dauerhafte Quelle.
- Südchilenische Großausbrüche** wie Hudson, Puyehue–Cordón Caulle, Calbuco — episodische Quellen für SO<sub>2</sub>/Sulfataerosole und Asche in hohen südlichen Breiten.
- South Sandwich Islands** — geographisch interessant, weil subantarktisch, aber meist weniger als große globale SO<sub>2</sub>-/Halogenquelle dokumentiert.
- Tropische Südhalbkugel-Vulkane** wie Ambrym, Yasur, PNG-Vulkane und äquatornahe Kongo-Vulkane — chemisch relevant, aber ihr Einfluss auf das antarktische Ozon hängt stark vom Transport in die Stratosphäre und in den polaren Wirbel ab.

## Der entscheidende Punkt

Für Ozonabbau sind nicht nur die Emissionen selbst entscheidend, sondern diese Kombination: **SO<sub>2</sub> + Halogene + Aerosoloberflächen + Stratosphäreninjektion + polare Kälte + Sonnenlicht im Frühjahr.**

SO<sub>2</sub> bildet Sulfat-Aerosole; diese Aerosole fördern heterogene Reaktionen, die Chlor- und Bromchemie aktivieren. Halogene wie HCl, HBr und daraus entstehendes ClO/BrO sind dann die eigentlichen katalytischen Ozonzerstörer. TROPOMI und OMI erfassen zahlreiche vulkanische SO<sub>2</sub>-Quellen; eine TROPOMI-Studie fand 58 eindeutig detektierbare entgasende Vulkane innerhalb weniger Monate, und die NASA führt einen fortlaufenden SO<sub>2</sub>-Katalog explosiver Eruptionen.

### Kurzfassung:

Die wichtigsten südhemisphärischen Vulkane mit ozonrelevanten Gasen und Partikeln sind **Erebus, Hunga Tonga, Ambrym, Yasur, Whakaari/White Island, Lascar, Villarrica, Copahue, Puyehue–Cordón Caulle, Calbuco, Hudson, South-Sandwich-Vulkane sowie mehrere PNG- und äquatornahe Kongo-Vulkane.** Für die antarktische Ozonschicht ist **Erebus** der dauerhaft interessanteste natürliche Kandidat; für großräumige südhemisphärische Stratosphäreneffekte war **Hunga Tonga 2022** außergewöhnlich.