

Vom SO₂ zum Aerosol in der Stratosphäre

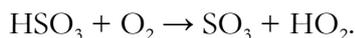
RENATE AUCHMANN | STEFAN BRÖNNIMANN | FLORIAN ARFEUILLE

Ergänzung zu dem Artikel „Tambora: das Jahr ohne Sommer“, Physik in unserer Zeit **2015**, 46(2), 64.

Einmal in der Stratosphäre angelangt, wird gasförmiges vulkanisches Schwefeldioxid (SO₂) oxidiert, durch die Reaktion mit dem Hydroxylradikal OH entsteht HSO₃ (gasförmig),



wobei M für einen nicht an der Reaktion teilnehmenden Stoßpartner steht. Danach reagiert das HSO₃ sehr schnell mit molekularem Sauerstoff O₂, woraus gasförmiges SO₃ entsteht:



Dieses reagiert mit H₂O zu Schwefelsäure (H₂SO₄):



Die Schwefelsäure kondensiert schnell, lagert weitere Wassermoleküle an und bildet Tröpfchen oder lagert sich an bestehende Partikel an. Unter den herrschenden Bedingungen bleibt das H₂SO₄+H₂O-Gemisch flüssig.

Die einzelnen Aerosolpartikel stoßen dann miteinander zusammen und bilden größere Aerosolpartikel (Abbildung 1). Dieser Vorgang heißt Koagulation. Dabei nimmt die Masse der Partikel zu, und ihre Fallgeschwindigkeit wird nicht mehr vernachlässigbar. Größere Partikel fallen deshalb aus der Stratosphäre heraus.

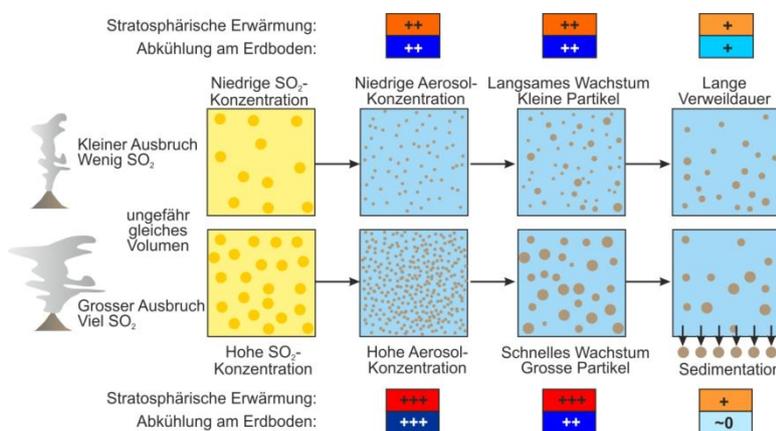


Abb. 1 Entstehung und Entwicklung der Aerosole in der Stratosphäre, die von SO₂ aus Vulkanausbrüchen erzeugt werden. Die hohe SO₂-Konzentration aus starken Vulkanausbrüchen (unten) sorgt im Endeffekt für große Aerosolpartikel, welche die Sonnenstrahlung absorbieren und die Atmosphäre aufheizen. Sie fallen allerdings auch allmählich aus der Stratosphäre heraus.

Tambora-Ausbruch

Der Tambora-Ausbruch hat große Mengen an SO_2 freigesetzt. Allerdings war das Volumen, über das sich die Gasmenge verteilte, vermutlich nicht viel größer als bei anderen Ausbrüchen, denn es wird vor allem durch den Auftrieb und damit die Temperaturschichtung der Stratosphäre bestimmt. Wird also eine größere Menge SO_2 in ein gleichbleibendes Volumen injiziert, ist auch die Konzentration größer, und es bilden sich mehr Aerosole. Damit spielen sich nun auch die Vorgänge in der Stratosphäre schneller ab. Die Wahrscheinlichkeit des Zusammenstoßes zweier Teilchen steigt. Teilchen koagulieren schneller und wachsen schneller an. Sie erreichen bald Größen, die sichtbares Licht nicht mehr effizient streuen, aber stark absorbieren.

Eine Eruption mit 60 Mt SO_2 wie diejenige des Tambora von 1815 wird am Erdboden also nicht einen vierfach stärkeren Abkühlungseffekt haben verglichen mit einer Eruption mit den 15 Mt SO_2 , die der Pinatubo 1991 ausstieß. Da aber die Effizienz der Absorption ungefähr gleich bleibt, wird die stratosphärische Erwärmung sehr stark ausfallen. Sie wird nur dadurch etwas abgedämpft, dass große Partikel aus der Stratosphäre herausfallen. Ungefähr zwei bis drei Jahre nach der Eruption sind so viele Partikel herausgefallen, dass sich die stratosphärische Schwefelmenge nicht mehr vom Normalzustand unterscheidet.

1816 – Wetter- oder Klimaänderung?

Die Kälteanomalien im „Jahr ohne Sommer“ waren in Mitteleuropa besonders groß. Was waren die Ursachen für diese Verstärkung in Europa? Welche Mechanismen spielten eine Rolle? Die Klimaforschung versucht, diese Fragen durch genaue Analyse von historischen Wetterbeobachtungen zu beantworten.

1816 gab es bereits mehrmals tägliche Messungen von wichtigen Wetterelementen wie Temperatur, Niederschlag und Wind, vor allem in Europa und Nordamerika. Das gilt auch für Genf, das mitten im Zentrum des damaligen Kälteeinbruchs lag. Diese Daten waren in zeitgenössischen naturwissenschaftlichen Journalen abgedruckt und mussten zunächst aufwendig digitalisiert werden.

Die Analyse ergab, dass vor allem die vermehrte Bewölkung zum kalten Sommer 1816 beitrug. Im Juni gab es keinen einzigen wolkenlosen Tag, im gesamten Sommer nur 15. Ursache ist eine Verschiebung der Wetterlagen. Nur ein Tag hatte eine Hochdrucklage, normal sind im Vergleichszeitraum zwanzig Tage mit einer solchen Schönwetterlage. Dafür gab es im Vergleich fast viermal so viele Tiefdrucklagen.

Interessant ist auch, dass die Morgentemperaturen im Vergleich mit zeitlich benachbarten Jahren kaum verändert waren, es gab nicht vermehrt außergewöhnlich kalte Morgen. Vor allem die Nachmittagstemperaturen waren im Mittel um 3-4 °C zu tief. Auch die Anzahl der Regentage war weit höher mit etwa 80 % mehr Regen als in den Vergleichsjahren (Abbildung 2 im Artikel im Heft rechts). Dabei regnete es aber nicht stärker, sondern nur öfter.

Der Grund für den insgesamt kalten und nassen Sommer 1816 waren also nicht einige wenige extrem kalte oder besonders regenintensive Tage, sondern im Mittel kältere und vermehrt verregnete Tage. Statistisch betrachtet hat sich also nicht die Verteilung selbst, sondern nur der Mit-

telwert geändert. Das wird in der Klimawissenschaft als Veränderung des Klimas bezeichnet. Das Jahr ohne Sommer zeichnete also keine Wetteränderung, sondern eine Klimaänderung aus.

Ist also allein die Veränderung der regionalen Zirkulation und somit der Wetterlagen schuld am fehlenden Sommer 1816? Jein.

Die vielen bewölkten Tiefdrucklagen und fehlenden Hochdrucklagen können nur einen Teil der Temperaturunterschiede im Vergleich zu „normalen“ Sommern erklären. Ein weiterer, in seiner Größe jedoch unbekannter Teil der Unterschiede wurde durch die direkte Abschirmung der Sonnenstrahlung durch die Aerosole verursacht. Wahrscheinlich spielen aber auch größer- und kleinere Prozesse –im Vergleich zu den regionalen Wetterlagen – in der Atmosphäre eine Rolle.