

Auf dem Satellitenbild zeichnen dichte Wolken und Aerosol-Dunst in der linken unteren Bildhälfte den Umriss des Roten Beckens im Südwesten Chinas nach. Links dieser extrem belasteten Luftmassen treten klar die mehr als 7000 Meter hohen vergletscherten Gipfel des „Blauen Tibetischen Gebirges“ hervor.



Aerosole - Würzstoffe in der Klimaküche

Wo immer auf der Erde „dicke Luft“ herrscht, wird es für sie besonders spannend. Denn

OLAF KRÜGER vom **METEOROLOGISCHEN INSTITUT DER UNIVERSITÄT HAMBURG** und

HARTMUT GRASSL, Direktor am Hamburger

MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR METEOROLOGIE, interessieren sich für Aerosole: winzige

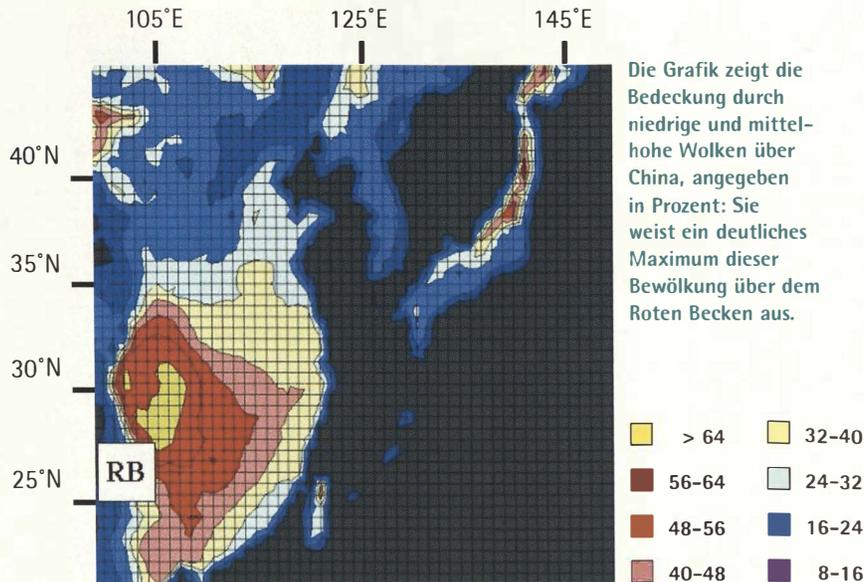
Teilchen oder Tröpfchen, die in der Luft schweben und eine bedeutende, doch in ihrem Ausmaß noch weithin unklare Rolle im Strahlungs- und Wasserhaushalt der Atmosphäre spielen. Nachstehend schildern die beiden

Forscher, was diese Schwebeteilchen als Klimafaktoren so „unberechenbar“ macht – und weshalb Regionen mit extrem verschmutzter Luft, wie das einstige „Schwarze Dreieck“ im östlichen Mitteleuropa oder das Rote Becken im Süden Chinas, für die Aerosolforschung regelrechte Fundgruben darstellen.

So klein und leicht sie sind, so schwer wiegen Aerosole als lokale und globale Klimafaktoren. Denn diese Schwebeteilchen – mit Durchmessern zwischen einem hundertstel und einem zehntausendstel Millimeter – greifen auf vielfältige Weise in den Strahlungs- und Wasserhaushalt der Atmosphäre ein. Das geschieht zunächst durch direkte Wechselwirkung: Die feinen Teilchen streuen oder absorbieren Licht- und Wärmestrahlung und behindern dadurch den Energiefluss von der Sonne auf die Erde sowie, umgekehrt, von der Erde zurück in den Weltraum.

Noch bedeutsamer als ihre direkte Wechselwirkung mit Strahlung ist allerdings der indirekte Effekt, den Aerosole entfalten – und zwar als Kondensationskeime: An ihnen schlägt sich der Wasserdampf der Luft nieder, bildet Tröpfchen und schließlich Wolken. Auch das modifiziert zunächst den Strahlungshaushalt der Erde: Im Allgemeinen verstärken Wolken die so genannte Albedo, das Rückstreuvermögen der Atmosphäre, da sie an ihren Oberseiten die Strahlung der Sonne zurück in den Weltraum spiegeln und damit kühlend wirken; es gibt jedoch dünne Wolken, die das Sonnenlicht fast ungehindert zum Erdboden durchlassen, die aber eine „Sperrschicht“ für die Wärmestrahlung vom Boden in den Weltraum bilden – und deshalb die Temperatur in Bodennähe nach oben treiben.

Als Wolkenkeime bestimmen Aerosole außerdem, wie viel Wasser – bei jeweils gegebener Luftfeuchte und Temperatur – am Ende in einer Wolke steckt und wie groß die einzelnen Wassertröpfchen innerhalb der Wolke werden. Beides entscheidet darüber, wie lange eine Wolke ihr



„Wasser halten“ kann, also wann und wo Niederschläge auftreten: Das macht Aerosole zu einem wesentlichen Faktor auch im Wasserhaushalt der Atmosphäre.

Dass die Schwebeteilchen als Klima-Faktoren schwer in den Griff zu kriegen sind, kommt in den Modellrechnungen zum Ausdruck, die Aufschluss über die vom Menschen angestoßene Erwärmung des Erdklimas liefern sollen: All diese Modelle weisen eine ziemlich weite Spanne aus, was die Erhöhung der globalen Temperaturen in den nächsten Jahrzehnten betrifft. Und diese Unsicherheiten gehen – via Wolken – wesentlich auf das Konto der Aerosole.

Denn deren Einfluss auf das regionale oder globale Klima, dabei insbesondere auf die Bildung von Wolken, hängt von vielfältigen physikalischen und chemischen Eigenschaften ab, in denen sich diese Partikel oder Tröpfchen unterscheiden. So bestimmt bereits ihr Durchmesser, wie lange sie in der Luft schweben; diese Verweilzeit reicht von wenigen Stunden bis zu mehreren Wochen – und dementsprechend verteilen sie sich auch mehr oder minder weit in der Atmosphäre.

Ebenfalls von der Größe, zudem aber von der mikrophysikalischen Beschaffenheit eines Aerosols – so von der Struktur seiner Oberfläche oder seiner Farbe – hängt es ab, welche Wellenlängen der Licht- oder

Wärmestrahlung an ihm bevorzugt gestreut oder von ihm absorbiert werden. Und noch komplizierter als bei diesen direkten optischen Wechselwirkungen liegen die Dinge beim indirekten Effekt der Aerosole, also ihrem Zusammenspiel mit Wasserdampf und ihrem Einfluss auf die Wolkenbildung: Diese Prozesse hängen wesentlich auch von chemischen Eigenschaften der Teilchen ab – und außerdem von meteorologischen Parametern, wie etwa von der Temperatur der Luft oder deren Gehalt an Wasserdampf.

BUNTE MISCHUNG IN REGEM WECHSEL

Dazu kommt, dass über jedem Ort der Erde ein Gemisch unterschiedlicher Aerosole lagert, dessen Zusammensetzung – und damit auch Wirkung – zeitlich mehr oder weniger rasch wechselt. Diese Aerosol-Fracht speist sich zum einen aus zahlreichen natürlichen Quellen: etwa aus der Windgischte der Ozeane, aus der Staubfracht von Stürmen, aus Vulkanen oder aus Vegetationsbränden. Zum anderen aber treibt auch der Mensch regional und global den Aerosol-Gehalt der Atmosphäre hoch: mit der Nutzung fossiler Energieträger in Automobilen, Flugzeugen, Kraftwerken und Fabriken, mit der Verbrennung von Kohle oder Holz in unzähligen „heimischen Herden“ und

Feuerstätten sowie über großflächige Brandrodungen zur Gewinnung von Weide- oder Anbauflächen.

Ihre Vielfalt, ihre Flüchtigkeit und ihr komplexer Einfluss auf den Strahlungs- und Wasserhaushalt der Atmosphäre machen die Aerosole zu insgesamt schwer berechenbaren Faktoren im Klimageschehen – und damit zu erheblichen Unsicherheitsfaktoren in Klimamodellen. So gilt zwar derzeit, dass sie den zusätzlichen, anthropogenen Treibhaus-Effekt global dämpfen. Demnach üben vor allem Sulfat-Aerosole, die über die Nutzung fossiler Energie durch den Menschen vermehrt in die Atmosphäre gelangen, einen erheblichen „Bremsseffekt“ aus. Denn sie fördern die Bildung von Wolken und erhöhen deren Lebenszeit – und vermindern dadurch den Strahlungsfluss von der Sonne zum Erdboden um bis zu zwei Watt pro Quadratmeter: Das würde den zusätzlichen, anthropogenen Treibhaus-Effekt, den man gegenwärtig auf einen um drei Watt pro Quadratmeter erhöhten Strahlungsfluss veranschlagt, deutlich mindern und gleichsam maskieren.

Doch diese pauschalen Zahlen sind keineswegs gesichert, und deshalb weisen Klimamodelle für den Anstieg der mittleren Temperatur in den nächsten Jahrzehnten immer noch einen beträchtlichen Spielraum aus – Unsicherheiten, die sich weder durch theoretische Berechnungen noch durch Experimente in einem Labor ausräumen oder eingrenzen lassen. Doch auch „Freilandstudien“, also Messungen vor Ort, liefern gewöhnlich keine global gültigen Aussagen. Denn der Aerosol-Status der Atmosphäre ist örtlich wie zeitlich ungemein wandelbar und hängt zudem von ebenfalls unsteten meteorologischen Bedingungen ab.

In seltenen Fällen allerdings bieten sich Situationen, die einer Art Großexperiment in Sachen Aerosole gleichkommen. Und über zwei solche Glücksfälle konnten wir in den vergangenen Jahren interessante und überraschende Einblicke in das komplexe Zusammenspiel dieser mikros-

kopischen Schwebeteilchen mit Wolken gewinnen. Der erste dieser beiden Fälle spielt in Mitteleuropa, und zwar im Gefolge der politischen Wende 1989: Nach diesem Datum wurden in der DDR, in Tschechien und Polen unzählige Industrieanlagen und Kraftwerke saniert oder stillgelegt – Dreckschleudern, die einst gewaltige Mengen an Schadstoffen in die Atmosphäre gepumpt und dieser Region den bezeichnenden Namen „Schwarzes Dreieck“ eingetragen hatten.

Der Schauplatz des zweiten Falls liegt im südöstlichen Asien, und dort vor allem im Roten Becken im Süden Chinas: Dort steigt infolge einer rasanten Industrialisierung die Belastung der Luft mit Schadstoffen seit Jahren an, was auch die Aerosol-Pegel über dieser Region inzwischen auf weltweite Spitzenwerte treibt.

„SCHWARZES DREIECK“ UNTER HELLEN WOLKEN

Wir haben – gestützt auf Messreihen von Satelliten – in den vergangenen Jahren untersucht, wie sich die Aerosol-Fracht über diesen Regionen jeweils auf die Wolkenbildung und damit auf die Strahlungsbilanz der Atmosphäre auswirkt. Dabei bot sich im Fall des „Schwarzen Dreiecks“ auch die bislang einmalige Gelegenheit eines Vorher-Nachher-Vergleichs. Denn dort war nach 1989 die Belastung der Luft durch Schwefeldioxid und Stickoxide – aus denen sich Sulfat- und Nitrat-Aerosole bilden – sowie durch Ruß und Flugasche binnen weniger Jahre drastisch gesunken. Dieses „Großreinemachen“ kam einem Experiment gleich – und wir wollten klären, ob und wie sich diese Säuberung auf den regionalen Zustand der Atmosphäre ausgewirkt hat.

Dafür boten sich Satelliten-Daten an. Denn von oben lässt sich am zuverlässigsten messen, wie viel Licht von Wolken gestreut und in den Weltraum zurück geworfen wird. Dieses Rückstrahlvermögen (Albedo) ist bei Wolken, die über Gebieten mit hoher Luftverschmutzung liegen, gewöhnlich stärker als bei Wolken über

Regionen mit reiner Luft. Denn je mehr Schwebeteilchen in der Luft auftreten, desto mehr und zugleich kleinere Wassertröpfchen entstehen in einer Wolke – und umso stärker streut diese Wolke das von der Sonne einfallende Licht zurück in den Weltraum. Von oben betrachtet erscheinen deshalb Wolken über verschmutzten Gebieten heller als andernorts. Und so auch die Wolken über dem östlichen Mitteleuropa vor 1989: Das „Schwarze Dreieck“ leuchtete für Satelliten besonders hell. Anders dagegen die Situation unter den Wolken; am Erdboden wurde es infolge der verminderten Sonnenstrahlung dunkler.

Das änderte sich allerdings nach 1989, als der Schadstoff-Ausstoß und damit die Aerosol-Pegel über dem „Schwarzen Dreieck“ geradezu schlagartig sanken. Dadurch lichteten sich binnen weniger Jahre auch die Wolken über Mittel- und Osteuropa, das heißt, sie reflektierten weniger Licht in den Weltraum zurück und ließen vermehrt Strahlung zum Erdboden durch. Wir prägten damals den Begriff „Gorbatschow-Effekt“: Er hatte zur Folge, dass sich der Strahlungseinfall am Erdboden in Mittel- und Osteuropa nach 1989 um etwa 1,5 Watt pro Quadratmeter verstärkte – und dass der ehemals durch den indirekten Effekt der Aerosole gebremste anthropogene Treibhauseffekt seitdem stärker auf Mitteleuropa durchschlägt (MAXPLANCKFORSCHUNG 3/2002, S. 16f).

In umgekehrter Richtung läuft das zweite „Großexperiment“ in der Atmosphäre über Süd- und Ostasien. Dort wachsen Wirtschaft, Industrie und der motorisierte Verkehr wie nirgends sonst auf der Erde – und parallel dazu der Ausstoß von Luftschadstoffen und damit auch von Aerosolen. Als sichtbares Zeichen dieser Entwicklung wurden 1999 im Rahmen einer Messkampagne über dem südlichen Asien sowie über dem Indischen Ozean von Satelliten aus bräunliche Schwaden gesichtet, deren Natur zunächst umstritten blieb: Handelte es sich um Schichten aus



Um die Millionenstadt Chengdu im Roten Becken liegt eine Industrieviertel, dessen Schloten die Belastung der Luft in dieser Region auf weltweite Spitzenwerte treiben.

stark lichtschluckenden Aerosolen – oder um echte, also tatsächlich braune Wolken?

Wir nahmen dieses Phänomen des „Asian Haze“ zum Anlass, den Zustand der Atmosphäre in jener Region und insbesondere das Rückstreuvermögen der Wolken über China anhand von Satelliten-Messreihen der vergangenen beiden Jahrzehnte zu analysieren. Und im Zuge dieser Untersuchungen erwies sich das Rote Becken im Süden Chinas als ein Paradebeispiel dafür, was Aerosole und deren Wirkung anbelangt.

WO ES BOOMT, DA QUALMEN SCHLOTE

Das Rote Becken, rund eine Million Quadratkilometer groß, ist fast vollständig von Gebirgszügen umschlossen, die im Westen und Südwesten mehr als 7000, nach Nordosten und Südosten immer noch 3000 Meter hoch aufragen. Entwässert wird diese gewaltige Mulde vom Jangtse, und zwar durch die engen Drei Schluchten – die schon teilweise durch einen Damm gesperrt und von einem Stausee gefüllt werden. Das Rote Becken zählt zu den Boom-Regionen Chinas; das Wachstum der Wirtschaft liegt dort schon seit langem bei etwa 10 Prozent pro Jahr.



Zum Inbegriff einer nach vorsintflutlichen Umweltstandards betriebenen Industrialisierung wurde die Region um Bitterfeld: Große wie kleine Dreckschleudern füllten die Luft über dem „Schwarzen Dreieck“ mit Unmengen an Schadstoffen.

Und mit fast derselben Rate steigt auch die Emission von Luftschadstoffen in dieser Region: von Flugasche, von Ruß und anderen Aerosolen sowie deren Vorläufergasen – die in dieser Gebirgssenne zudem noch länger als anderswo gefangen bleiben und die Luft erheblich trüben.

Erwartungsgemäß sollten die Wolken über dem Roten Becken, ähnlich wie über dem „Schwarzen Dreieck“ vor dessen Säuberung, von Satelliten aus hell erscheinen, also viel Sonnenlicht in den Weltraum zurückspiegeln. Doch das Gegenteil war der Fall: Die Satellitenbilder zeigten dort Wolken und Aerosolschwaden mit ungewöhnlich niedriger Albedo.

RUSS UND ASCHEN BILDEN EINE HEIZDECKE

Dieser zunächst widersprüchlich anmutende Sachverhalt erklärt sich daraus, dass die optische Wirkung von Aerosolen wesentlich von deren Gehalt an stark absorbierenden Partikeln wie Ruß oder Flugasche abhängt. So erscheinen Aerosole mit nur mäßigem Rußanteil – vom Weltraum aus gesehen – auch bei wolkenlosem Himmel über dem dunklen Ozean hell, über Schneeflächen hingegen dunkel. Entstehen unter dem Einfluss dieser Aerosole dann noch Wolken, tritt ein überraschendes Phänomen auf: Dünnere Wolken erscheinen heller, dickere hingegen dunkler – und dieser Umschlagpunkt verschiebt sich mit steigendem Rußanteil

des Aerosols hin zu immer dünneren Wolken. Deshalb beobachtet man bei extrem hohem Rußgehalt im Mittel über alle Wolken eine Verdunklung, also ein vermindertes Rückstreuvermögen. Und genau das ist über dem Roten Becken der Fall: Der hohe Gehalt an Ruß und Flugasche lässt dort die Wolken vergrauen und macht sie zu regelrechten Strahlenfallen, die dann infolge der absorbierten Strahlung auch noch wie „Heizdecken“ über der Region lasten.

Über Mitteleuropa hingegen überwog vor 1989 der „erhellende“ Effekt, da hier der Rußanteil im Aerosol niedriger lag. Doch nach der Wende – nachdem vor allem der Pegel an Sulfat-Aerosolen erheblich gesunken war – kam der Rußanteil (insbesondere aus Dieselfahrzeugen) stärker zur Geltung. Und deshalb sank die Albedo der Wolken über Mitteleuropa um 2 bis 3 Prozent.

Das bedeutet, auf den Punkt gebracht, dass in China dickere Luft, in Europa dagegen reinere Luft zu dunkleren Wolken führt: Ein Befund, der die hintergründige Rolle von Aerosolen im Strahlungshaushalt der Atmosphäre deutlich macht. In beiden Fällen, in China wie in Europa, tragen diese Effekte zur Erwärmung bei, da mehr Sonnenstrahlung in der Atmosphäre absorbiert wird. Dabei geht es um erhebliche Energiemengen. Das zeigt das folgende Zahlenbeispiel: Würde die mittlere Albedo der Erde, die zurzeit bei 30 Prozent liegt, global um nur 1 Prozent vermindert, dann würde die Erde im Mittel 2,4 Watt pro Quadratmeter mehr an Sonnenenergie aufnehmen – ein Betrag, der dem Hundertfachen der Energieflussdichte der gesamten Menschheit entspricht; denn deren Energieumsatz macht, auf die Erdoberfläche bezogen, nur 0,025 Watt pro Quadratmeter aus.

Andererseits bleibt viel Energie in den Wolken selbst hängen, wenn sich deren Albedo erniedrigt. Sinkt ihre Albedo, wie in Mitteleuropa, um 2 bis 3 Prozent, dann gehen am Erdboden 4 bis 6 Watt pro Quadratmeter verloren; schrumpft die Wolken-Albedo,

wie im Roten Becken, sogar um bis zu 10 Prozent, dann bedeutet das am Boden – etwa für die Bildung von Biomasse in Getreide – einen Ausfall von 20 Watt pro Quadratmeter.

Allerdings steckt diese am Boden fehlende Energie in den Wolken und damit in der unteren Atmosphäre. Und das berührt eine grundlegende Frage der Klimaforschung: Wirken Aerosole, indem sie die Erdoberfläche via Wolken regional abdunkeln, der anthropogenen Erwärmung der Erde entgegen? Unsere Antwort darauf: Jedenfalls nicht über dem Roten Becken, denn dort wird zwar nicht am Boden, aber in der Atmosphäre wesentlich mehr Sonnenlicht absorbiert als noch vor 15 Jahren. ●



PROF. DR. HARTMUT GRASSL (Jahrgang 1940) studierte Physik an der Universität München, wurde dort 1970 promoviert und habilitierte sich 1978 an der Universität Hamburg. Von 1976 bis 1981 leitete

er eine Wissenschaftlergruppe am Max-Planck-Institut für Meteorologie in Hamburg. Weitere Stationen seiner Laufbahn waren das Institut für Meereskunde in Kiel und das GKSS-Forschungszentrum in Geesthacht. Im Jahr 1988 wurde Grassl als Direktor ans Max-Planck-Institut für Meteorologie berufen, von 1994 bis 1999 war er Direktor des Weltklima-Forschungsprogramms. Im Jahr 2002 erhielt er das Große Bundesverdienstkreuz der Bundesrepublik Deutschland.



DR. OLAF KRÜGER (Jahrgang 1963) studierte Physik an der Freien Universität Berlin und Meteorologie an der Universität Hamburg. Die Promotion erfolgte am Fachbereich Geowissenschaften der

Universität Hamburg. Am GKSS-Forschungszentrum in Geesthacht und am Meteorological Synthesizing Center-West (EMEP) in Oslo beschäftigte er sich mit der numerischen Modellierung des Transports und der chemischen Umwandlung von Luftbeimengungen. Seit 1999 arbeitet Krüger in Lehre und Forschung am Meteorologischen Institut der Universität Hamburg. Sein Forschungsschwerpunkt ist gegenwärtig die Analyse von Satellitenmessungen.