Foto: ALIMDI.NET

Den **schmutzigen Fünf** auf der Spur

In manchen Regionen der Welt wird die Luftverschmutzung in den kommenden Jahrzehnten stark zunehmen. Wo, das prognostizieren **Jos Lelieveld** und seine Mitarbeiter am Mainzer **Max-Planck-Institut für Chemie**. In ihren Studien der Atmosphärenchemie decken sie zudem unerwartete Wirkungen mancher Substanzen auf.

TEXT **DIETER LOHMANN**

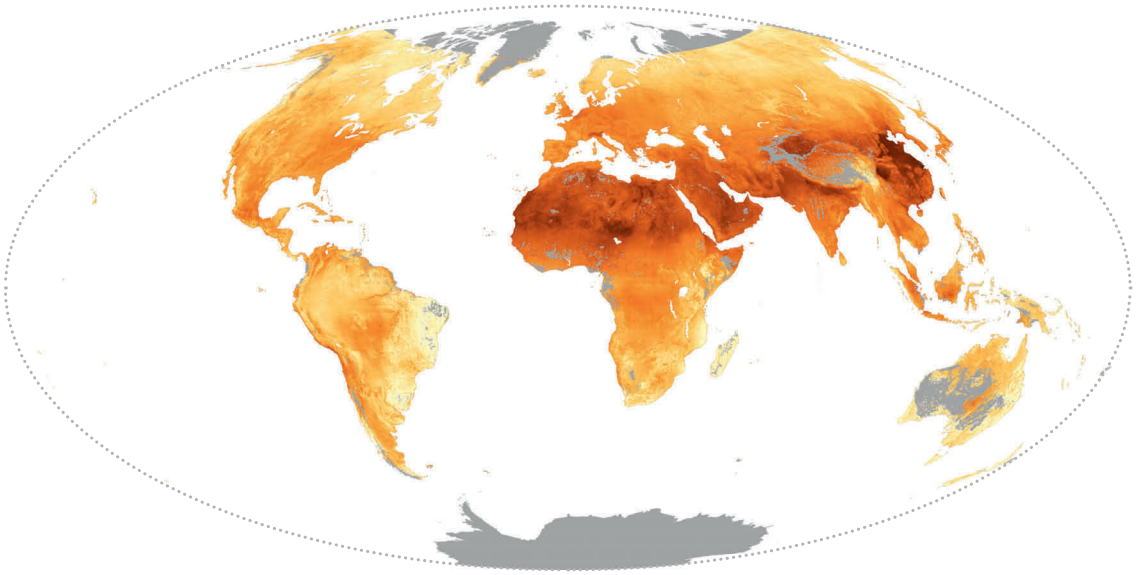
Die „schmutzigen Fünf" machen schon heute den Menschen in vielen Regionen der Erde das Leben schwer. Betroffen von hohen Schadstoffkonzentrationen sind beispielsweise die Megastädte Südostasiens und Afrikas. Mumbai in Indien gehört ebenso dazu wie Karatschi (Pakistan), Lagos (Nigeria) oder die chinesische Hauptstadt Peking. An manchen Tagen trauen sich die Einwohner dort nur noch mit Atemmasken auf die Straße.

In die Erdatmosphäre gelangen die fünf wichtigsten Luftschadstoffe in erster Linie über Autoabgase und Industrieemissionen. So stammt etwa ein großer Teil des Schwefeldioxids und des Feinstaubs aus mit fossilen Brennstoffen betriebenen Kraftwerken, Stickstoffdioxid dagegen vor allem aus dem ständig wachsenden Verkehrsaufkommen weltweit. Die Folgen dieser dicken Luft sind erheblich. Schon in geringen Mengen eingeatmet, können die Schadstoffe epidemiologischen Studien zufolge zu Herz-Kreislauf-Erkrankungen und Lungenkrebs, aber auch zu Asthma oder zur chronisch obstruktiven Lungenerkrankung (COPD) führen.

Einer, der sich bereits seit vielen Jahren mit den schmutzigen Fünf beschäftigt, ist Jos Lelieveld, Direktor am Max-Planck-Institut für Chemie in Mainz. Der Forscher kümmert sich aber nicht direkt um den Kampf gegen die Luftverschmutzung, das ist für ihn Sache der Regierungen. „Unsere Arbeit hilft bei der Aufklärung der großräumigen atmosphärischen Prozesse, die mit der dicken Luft in Verbindung stehen – vor allem in unserer globalisierten Welt", sagt Lelieveld.

Besonders dicke Luft: Wegen der wachsenden Industrie und des weiterhin zunehmenden Verkehrs wird die Luftverschmutzung in den kommenden Jahrzehnten vor allem in Süd- und Ostasien stark ansteigen.

Sein Team wirft einerseits einen Blick zurück in die Geschichte der irdischen Lufthülle, um so die Entwicklung der Schadstoffkonzentrationen in den vergangenen Jahrzehnten zu ermitteln. Andererseits interessiert die Wissenschaftler, wie sich die Luftqualität in Zukunft verändern wird. Als Handwerkszeug dient ihnen vor allem das chemische Atmo-



Eine Weltkarte der Luftverschmutzung: Über dunkel gefärbten Regionen haben Satelliten viel Feinstaub gemessen. In Nordafrika und Arabien ist die natürliche Belastung hoch. Nur in den hellgelben Gebieten liegen die Konzentrationen unter dem WHO-Grenzwert.

sphärenmodell EMAC (ECHAM-MESSy Atmospheric Chemistry), mit dem sie regelmäßig rechenintensive globale und lokale Simulationen ausführen.

EMAC ist vor einigen Jahren am Mainzer Institut entwickelt worden. Dazu wurde das bereits seit Längerem existierende ECHAM5-Klimamodell des Max-Planck-Instituts für Meteorologie in Hamburg mit einer neuen, modular strukturierten Software zur Erdsystemmodellierung (MESSy, Modular Earth Submodel System) verbunden.

Heute ist EMAC mit das Beste vom Besten, was den Atmosphärenforschern weltweit zur Verfügung steht. Denn das Modell ermöglicht es, die enge räumliche und zeitliche Kopplung luftchemischer und meteorologischer Prozesse weltweit flexibel im Computer zu simulieren. Die Forscher können so etwa aufdecken, welche Wechselwirkungen zwischen der Sonneneinstrahlung, dem Wasserdampfgehalt der Atmosphäre und der Luftverschmutzung bestehen. Mit EMAC ist nun ein ganzheitliches Erdsystemmodell vorhanden, mit dem sich die chemischen Interaktionen zwischen Vorgängen in der Atmosphäre, an Land und in den Ozeanen erforschen lassen.

EMAC bezieht bei den Berechnungen erstmals alle fünf wichtigen gesundheitsschädlichen Luftschadstoffe mit ein. Das klingt zunächst einfach, ist aber viel komplizierter als gedacht. „Um diese Schadstoffe simulieren zu können, muss man Dutzende chemischer Komponenten mit in das Modell aufnehmen“, sagt der Mainzer Forscher. Dazu zählen unter anderem die Vorläufersubstanzen von Ozon und Aerosolpartikeln.

All diese Mitspieler haben zudem unterschiedliche Quellen und Senken. Vor allem Wolken, Regen und Austauschprozesse mit der Vegetation spielen dabei eine wichtige Rolle. Eine zentrale Größe bei EMAC ist der sogenannte *Multi-Pollutant Index*, der den Grad der Luftverschmutzung durch Stickstoff- und Schwefeldioxid, Ozon, Kohlenmonoxid sowie Feinstaubpartikel in einem einzigen Wert zusammenfasst.

PRÄZISE PROGNOSEN FÜR DIE LUFTVERSCHMUTZUNG

Grundlage für die jüngsten Simulationen am Mainzer Institut waren die tatsächlichen Emissionen der schmutzigen Fünf 2005 sowie deren Trends in den Jahren danach. Auf dieser Basis wurde ein Business-as-usual-Szenario

Grafik: MPI für Chemie; Foto: Thomas Hartmann

» Wir müssen besser verstehen, welche Auswirkungen die sich rasch verändernde Zusammensetzung der Atmosphäre auf die globale Luftqualität und den Klimawandel hat.«

berechnet, bei dem man davon ausging, dass sich die bisherigen Umweltgesetze und deren Umsetzung nicht wesentlich ändern werden. Herausgekommen sind dabei einzigartige „Weltkarten der Luftverschmutzung“, die ungewöhnlich präzise Prognosen für die Jahre 2025 und 2050 liefern.

Und diese Zukunftswelten haben es in sich: In den nächsten Dekaden könnte es in vielen Teilen der Erde zu einer drastischen Verschlechterung der Luftqualität kommen. Vor allem in den Ballungsgebieten der Schwellen- und Entwicklungsländer würde das Atmen dann endgültig zur Qual, dichter Smog gehörte zum täglichen Leben. Zu regelrechten Schadstoff-Hotspots werden sich bis zum Jahr 2050 vermutlich insbesondere China, Nordindien und der Mittlere Osten entwickeln. Dort könnte die Luftverschmutzung teilweise sogar das Dreifache der heutigen Werte erreichen.

Regional unterschiedlich sind dem Business-as-usual-Szenario zufolge die Hauptprotagonisten der Luftverpestung. In Ostasien werden es vermutlich vor allem Stickoxide, Schwefeldioxid und Feinstaub sein, die den Menschen ordentlich zusetzen. In Nordindien und der arabischen Golfregion könnten außerdem die Ozonwerte neue Rekordmarken erreichen.

ZU VIELE LUFTSCHADSTOFFE IN EUROPA UND NORDAMERIKA

Ursache für die zunehmende Luftverschmutzung ist das prognostizierte Wirtschaftswachstum in diesen Gebieten. Dadurch steigen Verkehr und industrielle Produktion rasant an – und damit auch die Emissionen. Für das spezielle Schadstoffprofil des Mittleren Ostens sind neben den Abgasen aus der Erdölindustrie vor allem die hohe Sonneneinstrahlung und andere meteorologische Faktoren ursächlich.

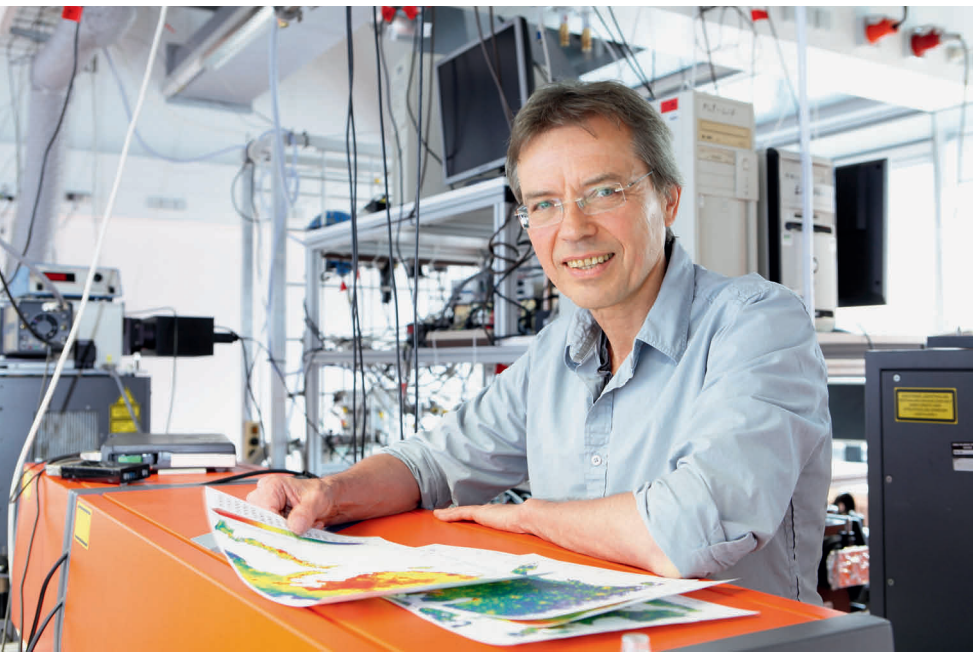
Im Vergleich zu den potenziellen Krisenregionen kommen Europa und Nordamerika glimpflicher davon. Hier erwarten die Forscher nur moderat steigende Werte. Grund dafür ist das größere Umweltbewusstsein auf diesen Kontinenten, das sich bereits jetzt in zum Teil sehr restriktiven und wirksamen Umweltauflagen niedergeschlagen hat. Effektive Emissionsfilter für Kohlekraftwerke gehören ebenso dazu wie leistungsfähige Autokatalysatoren. Und dennoch sind auch in Europa und in Nordamerika die Konzentrationen der Luftschadstoffe noch immer deutlich zu hoch.

Doch die aktuellen Simulationen sind erst der Anfang. In einem nächsten Schritt wollen die Mainzer Max-Planck-Forscher viele weitere Einflussfaktoren auf die Luftverschmutzung genauer unter die Lupe nehmen. Geplant ist etwa eine Studie, welche die Auswirkung des südasiatischen Monsuns auf die Neuverteilung der Schadstoffe in der nördlichen Hemisphäre und sogar in der Stratosphäre untersucht. „Wir müssen besser verstehen, welche Auswirkungen die sich rasch verändernde Zusammensetzung der Atmosphäre auf die globale Luftqualität und den Klimawandel hat“, meint Jos Lelieveld.

Er und sein Team haben zudem vor, die Atmosphäre über Afrika künftig genauer ins Visier zu nehmen. Dort ist schon heute ein einzigartiges Schadstoffgemisch in der Luft zu finden. Neben ganz viel Wüstenstaub gehören dazu gewaltige Mengen an Abgasen aus der Biomasseverbrennung.

Nirgendwo sonst auf der Erde stehen so viele Savannen und Wälder in Flammen, um neuen Platz für die Landwirtschaft zu schaffen. Die Mainzer Forscher wollen wissen, wie sich diese dicke Luft in den kommenden Jahrzehnten unter dem Einfluss der Erd-

Foto: Thomas Hartmann



Atmosphärenforschung im Labor: Jos Lelieveld und sein Team untersuchen das komplexe Zusammenspiel der Luftbestandteile auch in Experimenten an ihrem Mainzer Institut.

links: Mundschutz gegen schädliche Atemluft: Auch in Japan wird die Luft in den kommenden Jahren schmutziger. Schon heute versuchen sich in Tokio an manchen Tagen Bürger gegen Schadstoffe zu schützen.

rechte Seite: Anfang Januar 2012 waren die chinesischen Städte Peking und Tianjin (unten rechts, nahe der Meeresbucht) auf Satellitenaufnahmen noch gut zu erkennen (linkes Bild). Mitte Januar waren sie dann von einer außergewöhnlich dichten Smogglocke eingehüllt (rechtes Bild).

erwärmung und der vorhergesagten Zunahme der industriellen Emissionen weiterentwickelt.

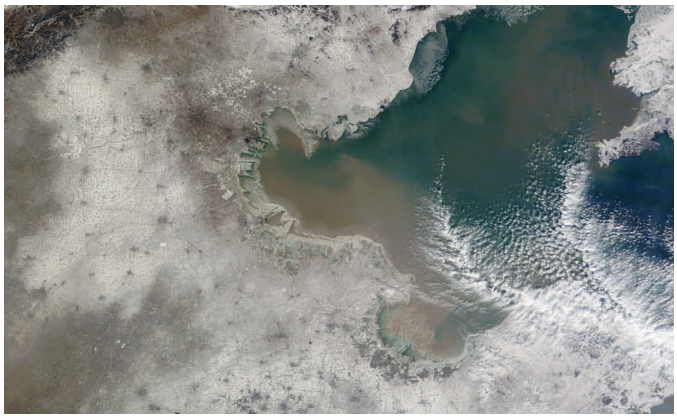
So pessimistisch die Zukunftsvision einer in weiten Teilen kranken Atmosphäre auch sein mag, es besteht durchaus noch Anlass zur Hoffnung. Denn in diesem Umweltdrama gibt es neben vielen Schurken auch einige Gute. Zu Letzteren gehören, wie man bereits seit Längerem weiß, die sogenannten Hydroxylradikale (OH-Radikale). Es handelt sich dabei um eine Art schnelle Eingreiftruppe in der Atmosphäre, die als effektives „Waschmittel“ die irdische Lufthülle von Schadstoffen befreit.

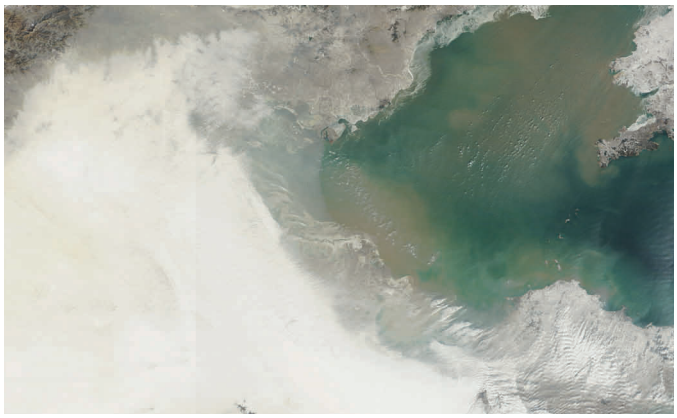
DIE SELBSTREINIGUNGSKRAFT IST ERSTAUNLICH ROBUST

Jedes einzelne „Scheuermolekül“ besteht aus einem Wasserstoff- und einem Sauerstoffatom und hat eine durchschnittliche Lebensdauer von weniger als einer Sekunde. Hydroxylradikale bilden sich in der Atmosphäre meist unter Einfluss von Sonnenlicht aus Ozon und Wassermolekülen oder bei der photolytischen Spaltung von Wasserstoffperoxid (H_2O_2).

Im Rahmen ihrer chemischen Putztätigkeit oxidieren die OH-Radikale Schadstoffe wie Kohlenmonoxid und andere Gase – etwa das besonders klimaschädliche Methan. Dabei entstehen aus den Ausgangsstoffen leichte, wasserlösliche Substanzen und Partikel, die anschließend, verpackt in Wassertropfen, mit dem Regen aus der Atmosphäre ge-

Foto: Corbis





waschen werden. Ohne die Hydroxylradikale wären der Klimawandel längst weiter fortgeschritten und die Luftqualität noch schlechter, als sie es ohnehin ist. Die Crux an dem effektiven Entsorgungsprozess: Auch Hydroxylradikale werden bei der Oxidation verbraucht.

Dennoch, so haben die Mainzer Forscher herausgefunden, ist ihre Konzentration in der Atmosphäre während der vergangenen Jahre erstaunlich stabil geblieben. Das hat eine Studie aus dem Jahr 2011 bestätigt, an der neben der US-amerikanischen National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) auch das Max-Planck-Institut für Chemie beteiligt war.

Die Atmosphärenforscher widerlegten damit frühere Vorstellungen, nach denen die Hydroxylradikal-Werte von Jahr zu Jahr um bis zu 25 Prozent schwanken. Die Resultate deuten darauf hin, dass die Selbstreinigungskraft der Erdatmosphäre durch die bisherigen Umweltveränderungen weniger beeinträchtigt wird als gedacht.

„Wir haben zwar vorausgesagt, dass die Selbstreinigung gut gepuffert ist, beweisen konnten wir es aber erst durch jahrelange systematische Messungen und modernste Modellierungsverfahren“, erklärt Lelieveld. Die Ergebnisse machen außerdem die Vorhersagen des Klimas und der globalen Luftqualität zuverlässiger, weil sich nun die Zusammensetzung der Atmosphäre mit Computermodellen besser beschreiben lässt.

Doch warum stehen Produktion und Verbrauch der atmosphärischen Reinigungsmittel trotz steigender Luftverschmutzung noch immer nahezu im Gleichgewicht? Die Antwort lautet: Recycling. Dieser Vorgang ist in der Erdatmosphäre offenbar weit verbreitet. Dem genauen Ablauf des Recyclings kamen die Mainzer Forscher vor gut eineinhalb Jahren auf die Spur. Ausgangspunkt für die Überlegungen war ein eklatanter Widerspruch zwischen den damaligen Modellrechnungen zu den Hydroxylradikalen und den Ergebnissen von Messkampagnen vor Ort.

Insbesondere über den Regenwaldgebieten der Erde gab es in der Atmosphäre viel mehr Reinigungspotenzial, als dort laut den Simulationen eigentlich sein durfte. Wie war das möglich? Die Forscher stellten einige Hypothesen auf, die meist aber schnell wieder verworfen werden mussten. Schließlich stießen sie bei der Suche nach einer Lösung für das Problem auf das Isopren.

Dieser ungesättigte Kohlenwasserstoff wird – ähnlich wie das viel bekanntere Methan – in gewaltigen Mengen von Pflanzen erzeugt und an die Umgebung abgegeben. Mindestens 500 Millionen Tonnen Isopren landen so jährlich weltweit in der Atmosphäre. Das meiste davon stammt aus den Bäumen der tropischen Regenwälder, bei denen es unter anderem in den ätherischen Ölen der Düfte zum Einsatz kommt.

Sollte es einen Zusammenhang zwischen den jeweils hohen Konzentrationen an Hydroxylradikalen und Isopren geben? Um das zu testen, wendeten die Atmosphärenforscher einen virtuellen Trick an: Sie erweiterten eines der bisherigen Modelle der Atmosphärenchemie um eine weitere Reaktionskaskade und schrieben dem Isopren dabei eine janusköpfige Wirkung zu. So entsteht beim Abbau von Isopren zunächst Hydroperoxyaldehyd (HPAL). Dabei werden Hydroxylradikale verbraucht.

DUFTSTOFF VON PFLANZEN RECYCELT HYDROXYLRADIKALE

Für das weitere Prozedere bauten die Wissenschaftler eine chemische Weiche ein: Sausen zum Zeitpunkt der HPAL-Bildung reichlich „Waschmittel“-Moleküle durch die Luft, wird HPAL mit ihrer Hilfe weiter zerlegt. Sind aber nur wenige Hydroxylradikale vorhanden, stellt sich die Weiche um: Unter dem Einfluss von Sonnenlicht reagiert das Hydroperoxyaldehyd dann in einer komplexen Folge von chemischen Umsetzungen mit dem Sauerstoff der Atmosphäre.

Dabei entstehen im Endeffekt mehr Hydroxylradikale, als bei der Umsetzung des Pflanzenparfüms Isopren zu HPAL benötigt werden. So weit die Theorie. Der Praxistest für das verbesserte Modell fehlte allerdings noch. Neue Simulationen brachten dann weitere Beweise: Die Überlegungen waren korrekt, reale Messungen und Modellrechnungen standen wieder im Einklang.

Dieses Reinigungsmittelrecycling ist ein wichtiger Baustein für die Luftreinhaltung vor allem in den Tropen. „Unsere Ergebnisse bedeuten aber auch, dass steigende Isoprenemissionen, wie wir sie

Fotos: NASA (2)

» Können Schadstoffe, die zufällig antagonistisch wirken, sowie effektive Puffermechanismen das Problem der prognostizierten, dramatisch steigenden Schadstoffkonzentration lösen? Nein, meint Jos Lelieveld.

durch die globale Erwärmung erwarten, nicht zur Steigerung des Klimaeffekts beitragen“, konstatiert Lelieveld. Denn ein höherer Isoprenanteil in der Luft kann die Produktion von Hydroxylradikalen ankurbeln – und damit auch den Kampf gegen klimaschädliche Gase.

Der 2012 aufgedeckte Mechanismus ist jedoch womöglich kein Sonderfall. Die Mainzer Forscher vermuten mittlerweile, dass auch einige vom Menschen in die Luft geblasene Schadstoffe antagonistisch wirken und die Selbstreinigungskraft der Atmosphäre auf ähnliche Weise puffern können wie Isopren.

Dass da was dran sein könnte, zeigt indirekt ein anderes Beispiel aus dem System Erde mit den vielseitigen Wechselwirkungen zwischen Atmosphäre, Lithosphäre, Hydrosphäre und Biosphäre. So gilt Stickstoff-Überdüngung seit Langem als massives Problem, denn dadurch können etwa gefährliche Nitrate ins Grundwasser gelangen. Saure Böden haben ebenfalls ein schlechtes Image, sie sind einer der Mitverursacher des Waldsterbens. Doch anscheinend können beide Bösewichte zusammen durchaus auch Positives bewirken.

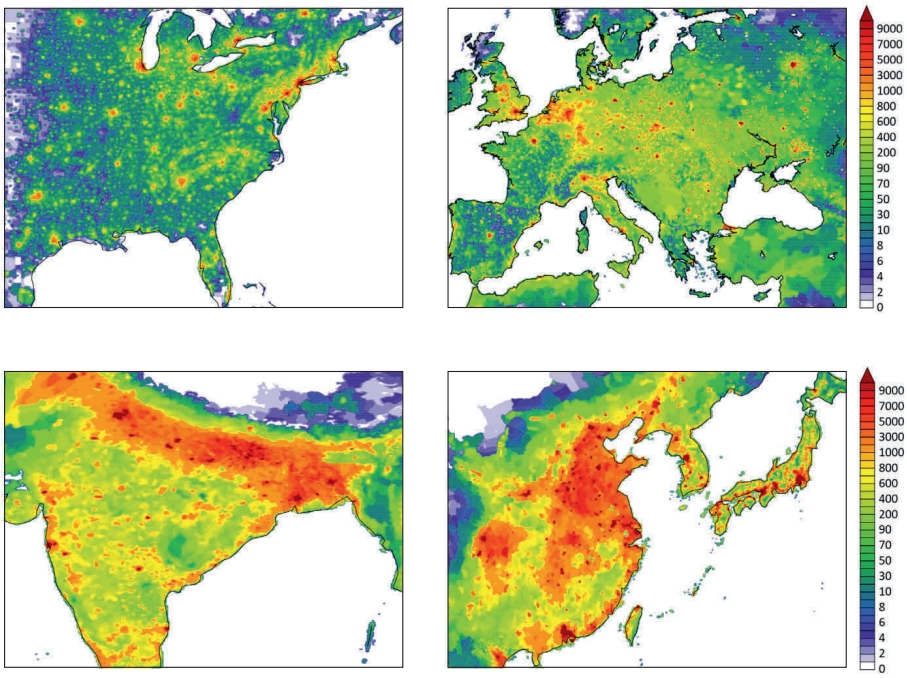
LÄSST DER KLIMAWANDEL MEHR HYDROXYL ENTSTEHEN?

Das enthüllte ein neuer Pfad im Stickstoffkreislauf, den man vor Kurzem in Laborexperimenten entdeckt hat. Demnach bildet sich in gut mit Stickstoff versorgten Böden aus Nitritionen und Wasser Salpetrige Säure (HNO_2). Je höher nun die Nitritkonzentration ist und je saurer der Boden, desto mehr HNO_2 wird produziert. Als gasförmige Salpetrige Säure (HONO) gelangt diese anschließend in die Atmosphäre, wo sie als Ausgangsprodukt für die Entstehung von Hydroxylradikalen dient.

Im Rahmen eines fortschreitenden Klimawandels könnte dieses Schwungrad der Waschmittelherstellung immer größere Bedeutung erlangen. Denn bei einem prognostizierten Dreiklang aus vermehrter Düngung, steigender Bodenversauerung und Erderwärmung wird Wissenschaftlern zufolge – vor allem in Entwicklungsländern – vermutlich erheblich mehr Salpetrige Säure aus dem Boden freigesetzt. Im Endeffekt steht dadurch mehr Futter für die Bildung von Hydroxylradikalen zur Verfügung, die Selbstreinigungskraft der Atmosphäre steigt.

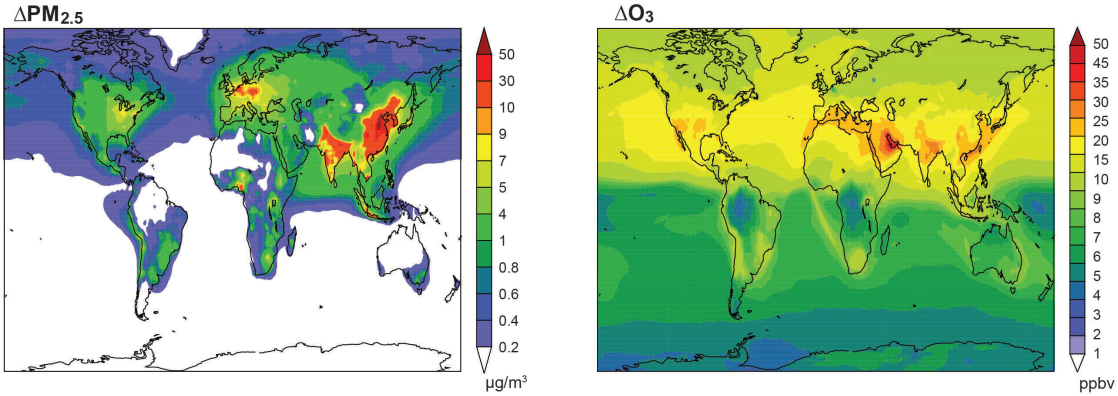
Die Putzmittelinventur in der Atmosphäre hat also mittlerweile einiges an Positivem ergeben. Aber können Schadstoffe, die zufällig antagonistisch wirken, sowie effektive Puffermechanismen das Problem der prognostizierten, dramatisch steigenden Schadstoffkonzentration wirklich lösen? Nein, meint Jos Lelieveld entschieden: „Auch wenn wir aufgrund dieser Phänomene weniger Grund zur Sorge um unsere Atmosphäre haben müssen, sollten wir dennoch alles dafür tun, den Ausstoß von klimaaktiven Gasen und Schadstoffen so weit wie möglich zu verringern.“

Ein wesentlicher Baustein im Kampf gegen die Luftverschmutzung sind nach Ansicht der Mainzer Forscher neue Gesetze und Technologien zur Verminderung von industriellen und privaten Emissionen. Besonders für die als künftige Schadstoff-Hotspots gehandelten Regionen könnte das womöglich die einzige Rettung sein. Doch lassen sich solche Maßnahmen gerade in Staaten mit enormem Wirtschaftswachstum überhaupt durchsetzen?



Gesundheitsrisiko Luft: Die Karten der östlichen USA, Europas, Süd- und Ostasiens zeigen, wie hoch dort im Jahr 2005 die Sterblichkeit aufgrund von kardiovaskulären Erkrankungen, Lungenkrebs und Erkrankungen der Atemwege lag, die sich auf die Belastung mit Feinstaub und Ozon zurückführen lassen (Angabe in Todesfällen pro 10 000 Quadratkilometern).

Grafik: MPI für Chemie



Die atmosphärischen Spuren der Industrialisierung: Von der vorindustriellen Zeit bis zum Jahr 2005 ist die Belastung mit Feinstaub (links, angegeben in Mikrogramm pro Kubikmeter) und mit Ozon (rechts, angegeben in milliardstel Anteilen am Gasvolumen) in vielen Gegenden der Welt angestiegen. Blau steht für eine schwache Zunahme, rot für eine starke.

Lelieveld zeigt sich optimistisch: „Ich sehe keinen Grund, warum bessere Umweltgesetze und -technologien in China, Indien und anderen Ländern nicht möglich sein sollten.“ Er ist felsenfest davon überzeugt, dass sie dem Wirtschaftswachstum nicht schaden – vor allem auf lange Sicht. Er sagt allerdings auch: „Umweltauflagen sind wie viele hochwirksame Operationen: Sie tun weh, bevor sie helfen.“

EINE BESSERE LUFTQUALITÄT SENKT GESUNDHEITSKOSTEN

So muss man zunächst einmal kräftig in die Entwicklung grüner Technologien wie energiesparender Autos und abgasarmer Kraftwerke investieren, im Endeffekt kommen die optimierten Techniken aber auch der Industrie und der jeweiligen Volkswirtschaft zugute. So sorgt etwa eine bessere Luftqualität dafür, dass die Kosten für das Gesundheitssystem und krankheitsbedingter Fehlzeiten bei den Arbeitern sinken.

Was in Sachen frische Luft in kürzester Zeit möglich ist, hat China anlässlich der Olympischen Spiele 2008 im eigenen Land gezeigt. Damals gelang es mithilfe zahlreicher Umweltauflagen, die dramatische Luftverschmutzung so zu senken, dass zumindest einigermaßen akzeptable Bedingungen für die Athleten herrschten. Die Kehrseite der Medaille: Mittlerweile ist man im Reich der Mitte wieder in den alten Trott verfallen. Die Luftverpestung hat längst schon wieder die vorolympischen Ausmaße erreicht.

Nicht nur Schwellen- und Entwicklungsländer sind im Ringen um bessere Luft gefragt, auch in Europa oder Nordamerika gibt es keinen Grund, die Hände in den Schoß zu legen. „Luftverschmutzung bewegt sich weltweit vergleichsweise so schnell, wie es die Finanzen tun”, zieht Jos Lelieveld einen interessanten Vergleich. So können etwa die Emissionen der qualmenden Kraftwerksschlote und Autoauspuffe in Ostasien mit globalen Winden wie den Jetstreams innerhalb von ein oder zwei Wochen zu uns gelangen.

Deshalb müssen die existierenden Umweltauflagen und -techniken hierzulande ebenfalls weiterentwickelt und an mögliche zukünftige Bedingungen angepasst werden. „Unsere Forschung dient als Grundlage für angewandte Projekte, die wiederum zu kostengünstigen Maßnahmen der Luftreinhaltung führen und dazu, dass die Netzwerke zur Überwachung der Luftverschmutzung optimiert werden“, erläutert der Max-Planck-Direktor.

Wie (lebens-)wichtig der Kampf gegen die schmutzigen Fünf und andere Luftschadstoffe ist, das zeigen aktuelle Berechnungen der Mainzer Wissenschaftler. Demnach sterben schon heute jährlich weltweit rund drei Millionen Menschen an anthropogen bedingter schlechter Luft – 50 000 davon allein in Deutschland. Wenn in den nächsten Jahrzehnten keine Maßnahmen gegen die Verschmutzung der Erdatmosphäre ergriffen werden, dann wird es in Zukunft noch viel mehr Tote durch das „mörderische Quintett“ geben. ◂

AUF DEN PUNKT GEBRACHT

- **Fünf Luftschadstoffe (Stickstoffdioxid, Schwefeldioxid, Ozon, Kohlenmonoxid und Feinstaubpartikel) aus Autoabgasen und Industrieemissionen schaden Mensch und Atmosphäre.**
- **Mit dem Modell EMAC simulieren Forscher am Computer die enge räumliche und zeitliche Kopplung luftchemischer und meteorologischer Prozesse.**
- **In den nächsten Dekaden könnte es zu einer drastischen Verschlechterung der Luftqualität kommen, vor allem in den Ballungsgebieten der Schwellen- und Industrieländer.**
- **Obwohl die Menge an Reinigungsmittel in der Atmosphäre über die Jahre hinweg erstaunlich konstant geblieben ist, bedarf es neuer Gesetze und Technologien, um der atmosphärischen Schadstoffbelastung entgegenzuwirken.**

Grafik: MPI für Chemie