

Atemlos in der Großstadt

Megacitys locken mit der Aussicht auf Arbeit und ein Leben in städtischer Infrastruktur. Doch sie belasten ihre Bewohner auch mit hoher Luftverschmutzung. **Bhola Ram Gurjar** analysiert mit einer indischen Partnergruppe des **Max-Planck-Instituts für Chemie** in Mainz die Schadstoffbelastungen und wie stark diese die Gesundheit der Bewohner beeinträchtigen.

TEXT **GANAPATI MUDUR**

Wenn Bhola Ram Gurjar sein Forschungsobjekt aus dem Flugzeug sieht, ist er immer wieder fasziniert. Der Umweltchemiker wurde auf einem Bauernhof groß, auf dem Perlhirse angebaut und Schafzucht betrieben wurde. Der Hof lag in einem Dorf ohne Stromversorgung in der Nähe des Ranthambore-Forsts, eines Tigerschutzgebiets im Westen Indiens. Heute beschäftigt Gurjar sich mit Megacitys – Städten, die zehn Millionen Einwohner haben und mehr. Und wenn er sich im Landeanflug auf Delhi, Shanghai oder Los Angeles befindet, staunt er immer wieder über die Ausdehnung dieser Ballungszentren, die dicht gedrängten Gebäude, Verkehrsadern, Industriegebiete und Grünflächen.

„Moderne Städte gehören zu den Errungenschaften der Menschen“, sagt Gurjar. Doch bei allen Vorteilen, die Städte bieten, sie bringen auch gravierende Nachteile mit sich. So sei die Luft

in einigen dieser gewaltigen Knotenpunkte menschlicher Aktivität hochgradig verschmutzt. „Städte sind großartige Lebensräume“, sagt Gurjar, „doch sie lassen sich noch verbessern, wenn wir derartige Probleme in den Griff bekommen.“ Dazu möchte der Umweltchemiker, der eine *associate* Professur am Indian Institute of Technology in Roorkee hält, beitragen.

HINWEISE, UM DIE LUFTQUALITÄT ZU VERBESSERN

Um die Luftverschmutzung und ihre Folgen in Millionenzentren zu erforschen, scheint Roorkee nicht gerade der geeignete Standort zu sein. Die Stadt im Vorland des Himalaja-Gebirges bringt es nicht einmal auf 150000 Einwohner – für indische Verhältnisse also eine Kleinstadt. Größere, die Umwelt verschmutzende Industrie gibt es hier auch nicht. Doch auf Gurjars Desktop wimmelt es von Luftqualitätsdaten, sie machen die Luftverschmut-



Smog über Mumbai: Die Luft einiger Megacitys enthält so viele Schadstoffe, dass sie Tausende zusätzliche Todesfälle verursacht, in Indiens Hauptstadt rund 10000 pro Jahr.



» Ohne die Massenmedien geht gar nichts. Dennoch wirkt die große Mehrheit aus weniger gut verlinkten Twitter-Nutzern wie ein Verstärker für Nachrichten von den Massenmedien.

zung von Peking, Neu-Delhi, Los Angeles und 15 weiteren Megacitys für Bhola Ram Gurjar greifbar.

Um in Megacitys die Luftqualität zu verbessern, hat Gurjar sich mit Jos Leiveld, Direktor am Max-Planck-Institut für Chemie in Mainz, zusammengesetzt. Gemeinsam haben sie Ri-MAP (*Risk of Mortality-Morbidity due to Air Pollution*) entwickelt: ein mathematisches Modell, das Vorhersagen trifft, wie viele zusätzliche Todesfälle ein bestimmter Grad der Luftverschmutzung fordert, verglichen mit einem Leben in sauberer Atmosphäre. Das Programm könnte Behörden in Megastädten überall auf der Welt helfen, die Luftqualität

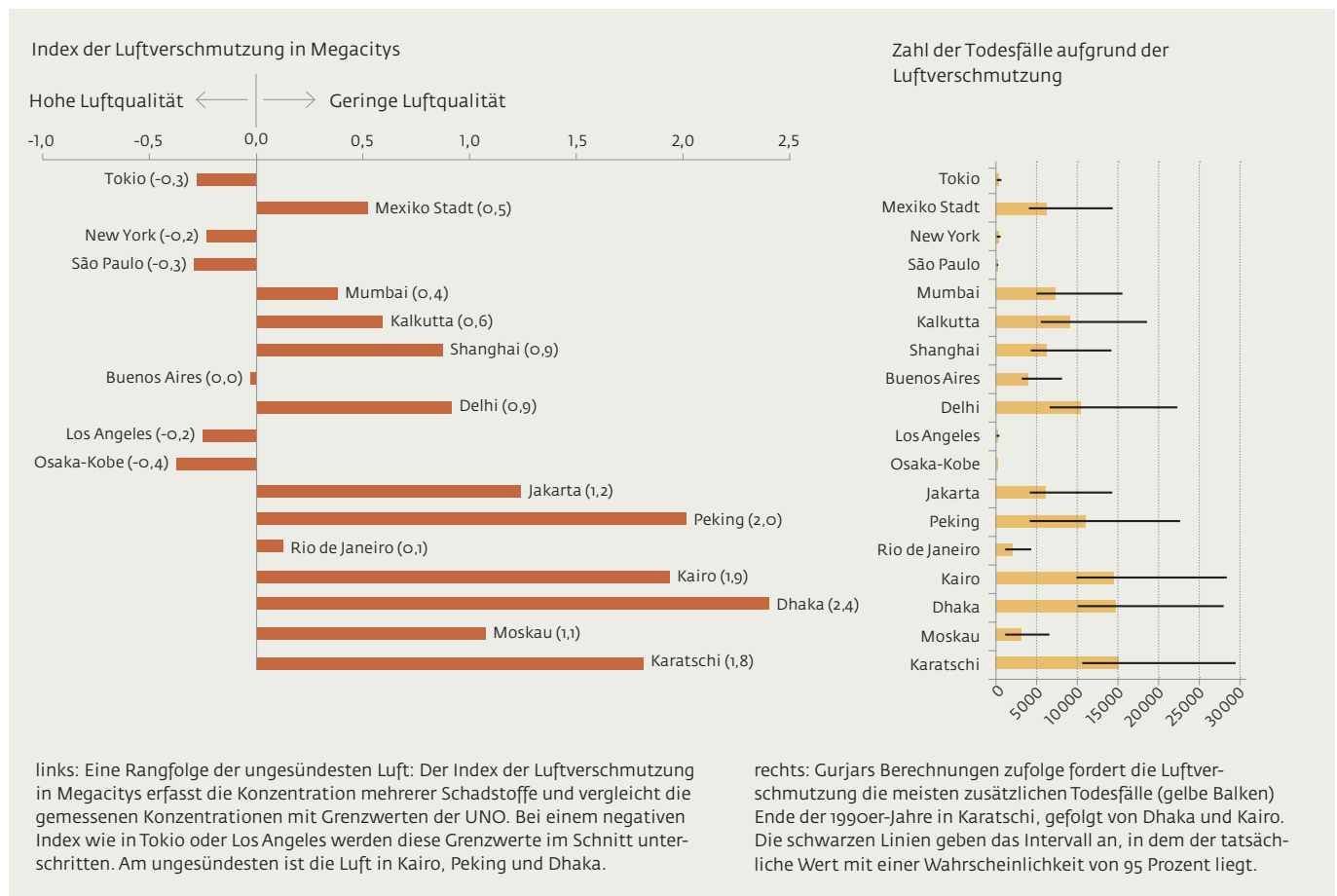
zu verbessern. Es ermöglicht ihnen nämlich, anhand verlässlicher Daten statt bloßer Mutmaßungen gezielte Maßnahmen zu planen, besonders gefährliche Schadstoffe zu reduzieren.

GEPRÄGT VON DER KATASTROPHE IN BHOPAL

Zur Analyse der Luftqualität und deren Auswirkung auf die Gesundheit fand Gurjar erst auf Umwegen. Vor fast 40 Jahren erhielt er ein staatliches Stipendium, das ihm half, sich an einer Ingenieurschule in Jodhpur einzuschreiben. Er erinnert sich noch daran, wie er beim Licht einer Kerosinlampe in sei-

nem Dorf Daulatpura studierte. Ohne sich darüber viele Gedanken zu machen, hatte er sich für die Fachrichtung Bauingenieurwesen entschieden. „Die Vorstellung, Ingenieurwesen zu studieren, begeisterte mich so sehr, dass es mir nicht so wichtig war, welchen Zweig ich wählte. Der Junge, der neben mir sein Formular ausfüllte, entschied sich für Bauwesen, und daher tat ich das auch“, erinnert sich Gurjar.

Nachdem er sein Ingenieurdiplom erhalten hatte, arbeitete er in seinem ersten Job am Bau einer Landebahn in Westindien mit. Doch er empfand die Zusammenarbeit mit Baufirmen und den bürokratischen Aufwand bei öffent-



lichen Bauvorhaben als so frustrierend, dass er gleich wieder in die akademische Welt zurückkehrte. An seinem College schloss er zunächst einen Master-Studiengang ab und promovierte dann am IIT in Neu-Delhi.

Mit der Bewertung von Umweltrisiken begann er sich verstärkt in den 1990er-Jahren zu beschäftigen, während er am IIT in Neu-Delhi studierte. Schon damals interessierten ihn Luftschadstoffe, nicht zuletzt weil man in Indien zu der Zeit noch die bis dahin schlimmste Industriekatastrophe der Geschichte in frischer Erinnerung hatte: Im Dezember 1984 war in Bhopal aus einem Leck in einem Lagertank das giftige Gas Methylisocyanat entwichen und hatte mindestens 2500 Menschen getötet.

DAS THEMA MEGACITIES WIRD IMMER RELEVANTER

Das Unglück sensibilisierte auch Gurjar für die Gefahren, die von Luftschadstoffen ausgehen. Daher erstellte er eine Risikobewertungsstudie und setzte darin die Krebsraten in einigen indischen Städten in Beziehung zu potenziell karzinogenen Substanzen, die Umweltschutzbehörden dort dokumentiert hatten.

Noch am Tag, an dem er seine Doktorurkunde vom IIT in Neu-Delhi erhielt, erfuhr Gurjar von einem Wissenschaftler aus den USA, dass Jos Lelieveld für seine Abteilung promovierte Wissenschaftler suchte. Die Gruppe widmet sich der Atmosphärenchemie, und Lelieveld selbst hatte die Wechselwirkungen zwischen der Atmosphärenchemie und dem Klima studiert und auch den Einfluss des Monsuns auf die Umweltverschmutzung und die Selbstreinigungskraft der Atmosphäre untersucht.

Gurjar bewarb sich, und man bot ihm eine dreijährige Forschungsstelle an. Fast gleichzeitig hätte er ein Stipendium für die Universität Harvard haben



- | | |
|-------|--|
| oben | Einen Beitrag zu besserer Luftqualität in Megacities möchten Bhola R. Gurjar (Mitte) und seine Mitarbeiter, hier Pralhad Walvekar (rechts) und Ajay S. Naggure, leisten. |
| unten | Ein Büro der Max-Planck-Partnergruppe „Megacities and Global Change“ mit Tapesh Mishra, Pralhad Walvekar, Shweta Saxena und Vandana Tzagi (von links nach rechts). |

können. Lelieveld gewann ihn schließlich zum einen mit einer Analyse, die belegte, dass die Max-Planck-Gesellschaft in der Atmosphärenchemie mehr Publikationen vorzuweisen hatte als Harvard. Zum anderen, so gibt Gurjar heute zu, erlaubte ihm das Gehalt eines promovierten Forschers in Deutschland, seine Frau mitzunehmen. Das Harvard-Stipendium hätte dagegen gerade mal für ihn selbst gereicht.

Als er in Mainz eintraf, bot Lelieveld ihm an, sich ein beliebiges Forschungs-

thema auszusuchen. „Das war eine ziemlich Überraschung“, sagt Gurjar. In Indien schiebe ein Mentor seine Schützlinge gewöhnlich taktvoll, aber bestimmt in eine thematische Richtung. „Ich entschied mich für die Luftverschmutzung in Megastädten, und Lelieveld teilte meine Begeisterung für dieses Thema offenbar.“

Megastädte, davon waren beide Forscher überzeugt, würden künftig immer wichtiger, auch in der Forschung. Und tatsächlich stieg die Zahl der Ballungs-



links | Nitin Bhargava, Simerpreet Singh und Mandeep Sidhu analysieren Daten zur Luftverschmutzung in verschiedenen Megacitys.
mitte | Diese Lösungen und Chemikalien verwenden die Chemiker um Bhola Gurjar, um in Luftproben die Konzentration von Schadstoffen wie Stickoxiden und Schwefeldioxid zu bestimmen.

räume mit zehn Millionen Einwohnern oder mehr von zwei im Jahre 1950, als gerade einmal Tokio und New York diese Grenze überschritten, auf 20 zu Beginn des 21. Jahrhunderts. Einigen Prognosen zufolge soll die Bevölkerung in Städten bis zum Jahr 2030 weltweit auf fünf Milliarden Menschen anwachsen. Acht der zehn größten Megastädte werden dann in Asien oder Afrika liegen.

LUFTSCHADSTOFFE LÖSEN VIELE KRANKHEITEN AUS

Mit dieser Entwicklung geht einher, dass immer mehr Menschen gesundheitsschädliche Luft atmen werden. Die Probleme unterscheiden sich dabei von Stadt zu Stadt. Die hohe Verkehrsdichte und die industriellen Aktivitäten erzeugen über Megastädten nämlich jeweils eine charakteristische Luftverschmutzung. In unterschiedlicher Zusammensetzung finden sich in der Stadtluft erkleckliche Mengen Kohlenmonoxid, Schwefeldioxid, Oxide des Stickstoffs, Feinstaub – wie etwa Rußpartikel – sowie organische Verbindungen, die etwa bei der Verbrennung von fossilen Brennstoffen freigesetzt

werden. Manche Megastädte erzeugen dabei mehr Abgase als ganze Länder. So setzte etwa Peking im Jahr 2000 insgesamt 2,7 Millionen Tonnen Kohlenmonoxid frei, mehr als Portugal – dabei nimmt Peking nur ein Fünftel der Fläche Portugals ein.

Die Abgaskonzentrationen, die sich so ergeben, sind der Gesundheit gewiss nicht zuträglich. Seit Langem werden sie mit Atemwegserkrankungen wie Asthma in Verbindung gebracht, doch in den letzten Jahren wurden auch Zusammenhänge zwischen der Luftverschmutzung und einer Reihe anderer Krankheiten nachgewiesen: von Herz-Kreislauf-Erkrankungen bis hin zu Brustkrebs.

Vor fünf Jahren haben Forscher der Universität New York, der Mount Sinai School of Medicine sowie der Universität Michigan Ergebnisse geliefert, denen zufolge Feinstaub mit einem Durchmesser von 2,5 Mikrometern Atherosklerose verursachen kann, die wiederum einen Risikofaktor für Herzkrankungen darstellt. Vor zwei Jahren berichteten Forscher des Fritz-Haber-Instituts der Max-Planck-Gesellschaft, dass Feinstaub von weniger als 20 Nanometer Größe noch stärkere Entzündungen hervorru-

fen kann als größere Mikropartikel. Und erst kürzlich berichteten Wissenschaftler am Institut für Krebsepidemiologie in Kopenhagen, dass eine langfristige Belastung selbst durch eine geringe Luftverschmutzung das Risiko erhöht, eine schwere und chronische obstruktive Lungenerkrankung zu erleiden, die den Menschen das Atmen zur Last macht.

Damit wird immer deutlicher, dass nicht nur hochgradig verschmutzte Luft einen Risikofaktor darstellt – sie schadet selbst bei einer kurzfristigen Belastung. Vielmehr können selbst geringe Schadstoffkonzentrationen schädlich sein, wenn Menschen ihnen über lange Zeit ausgesetzt bleiben.

Welche Luftschadstoffe Bewohner mit der Atemluft aufnehmen und wie sich dies auf ihre Gesundheit auswirkt, beschäftigte Bhola Ram Gurjar auch während seines dreijährigen Aufenthalts in Mainz. In dieser Zeit stellte er ein Emissionsinventar für die indische Hauptstadt Neu-Delhi auf, in der das Fahrzeugaufkommen in den letzten Jahrzehnten explosionsartig anstieg, ohne dass die städtische Infrastruktur entsprechend mitgewachsen wäre. Zwi-



rechts | Präzisionsarbeit im Labor: Simerpreet Singh pipettiert genau abgemessene Mengen der Chemikalien in ein Probengefäß.

schen 1971 und 2001 nahm die Gesamtlänge des Straßennetzes um das 3,5-Fache von 8380 Kilometer auf 28508 Kilometer zu. Im selben Zeitraum wuchs die Zahl der Fahrzeuge in der Stadt um 20-Fache, nämlich von 180000 auf fast 3,5 Millionen.

„Die Inventur hat uns geholfen, einige falsche Vorstellungen bezüglich der Quellen der Luftverschmutzung zu beseitigen“, sagt Gurjar. In den 1990er-Jahren galt der öffentliche und private Verkehr als Hauptursache für die Schadstoffbelastung in der Luft Delhis. Gurjars Analyse zeigte jedoch, dass kohlebetriebene Kraftwerke bis zu 80 Prozent zu den Schwefeldioxid- und Feinstaubemissionen in der Stadt beitrugen.

Die Ergebnisse machten klar, dass ein Emissionskataster für die Megastädte her musste. Also forderten Gurjar und Lelieveld in einem Kommentar für die Fachzeitschrift *ATMOSPHERIC ENVIRONMENT* ein internationales Programm, um Daten über Schadstoffemissionen zu sammeln und deren lokale und globale Auswirkungen abzuschätzen.

Und die beiden Forscher ließen ihren Worten Taten folgen. Bhola Ram Gurjar kehrte kurz nach der Veröffent-

lichung des Artikels nach Indien zurück und trat eine Stelle am Indian Institute of Technology in Roorkee an. Er und Lelieveld schufen dort eine Max-Planck-Partnergruppe zur Erforschung der Luftqualität in Megastädten. Solche Partnergruppen ermöglichen es ausländischen Wissenschaftlern nach einem Aufenthalt an einem Max-Planck-Institut, die Forschungskooperation und dort begonnene Projekte in ihrer Heimat fortzusetzen.

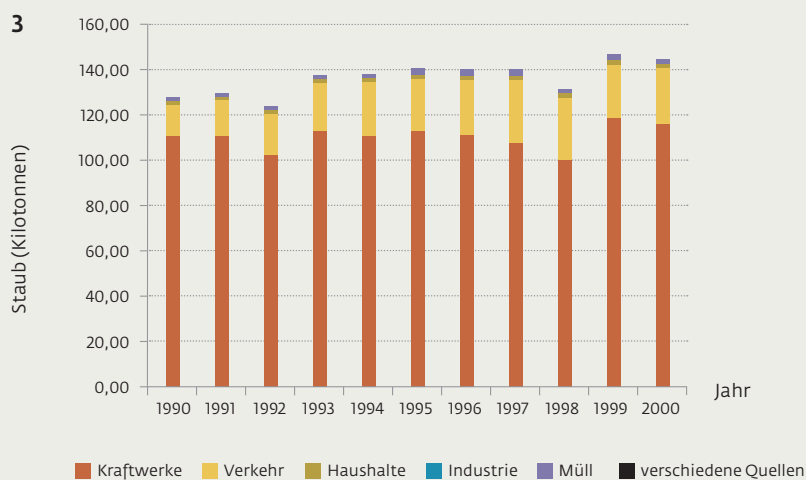
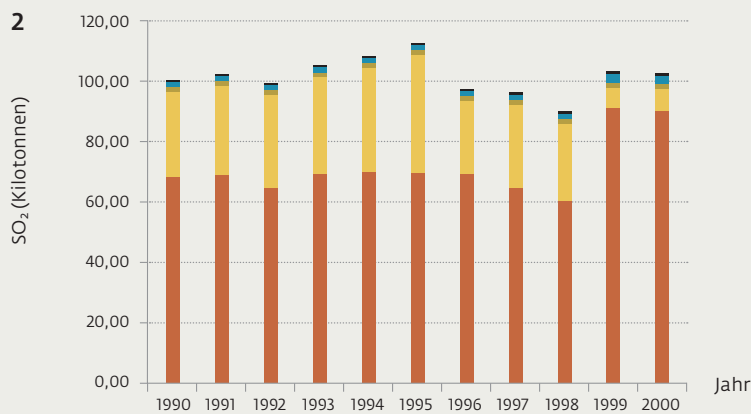
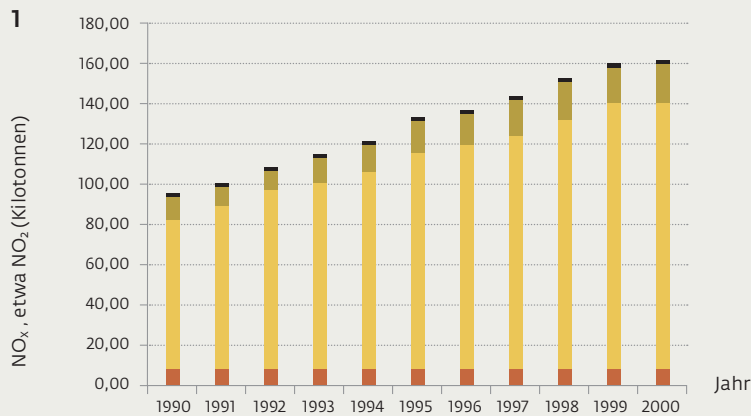
15000 ZUSÄTZLICHE TODESFÄLLE IN KARATSCHI

Zunächst untersuchten die Wissenschaftler die Emissionen der 18 größten Megastädte der Welt und stellten eine Rangordnung gemäß ihrer Luftqualität auf. Den Werten zufolge, die im Jahr 2000 gemessen wurden, stieg etwa über Tokio, Peking und Shanghai am meisten Kohlenmonoxid auf, während Peking, Shanghai und Los Angeles die höchsten Kohlendioxidemissionen pro Einwohner aufwiesen.

In Dhaka stellten die Forscher die höchste Schwefeldioxidkonzentration fest, gefolgt von Peking und Shanghai –

und jede dieser drei Megastädte hatte Schwefeldioxidwerte, die die von der Weltgesundheitsorganisation (WHO) empfohlenen Normen überschritten. Moskau, Peking und Jakarta wiederum hielten den wenig rühmlichen Rekord der höchsten Konzentrationen an Stickstoffdioxid, in Karatschi, Kairo, Dhaka und Delhi mussten die Bewohner mit der stärksten Feinstaubbelastung leben.

Gurjar und Lelieveld waren jedoch nicht zufrieden damit, lediglich eine Rangfolge der Schadstoffkonzentrationen aufzustellen. Sie wollten Megastädte nach den tatsächlichen Auswirkungen dieser Schadstoffe auf die Gesundheit ihrer Bevölkerung ordnen. Ri-MAP ist das Ergebnis ihrer fünfjährigen Bemühungen – ein Modell, das verschiedene Daten kombiniert: die Bevölkerung einer Megastadt, ihre Luftqualität sowie die Risiken, die jeder Luftschadstoff für die menschliche Gesundheit birgt. Anhand eines Satzes von Konzentrations-Wirkungs-Beziehungen sagt es die zusätzlichen Todesfälle in jeder der Megastädte voraus, die auf die einzelnen Luftschadstoffe zurückgeführt werden können. >



Die Quellen verschiedener Schadstoffe in Delhi: Untersucht haben Bhola Ram Gurjar und seine Mitarbeiter die Emissionen aus Kraftwerken, Verkehr, Haushalten, Industrie, Landwirtschaft und Müll. Stickoxide wie Stickstoffdioxid stammen vor allem aus dem Verkehr, der ständig wächst (1). Die dünnen schwarzen Balken stehen für eine Mischung der nicht einzeln dargestellten Quellen (1 und 2). Den größten Teil des Schwefeldioxids setzen Kraftwerke frei (2). Zwischen 1996 und 1998 sanken die Emissionen, weil schwefel-ärmer Diesel eingeführt wurde und 1998 zudem die Kraftwerke weniger Brennstoff umsetzten. Der wachsende Verkehr überkompensiert die Einsparungen inzwischen jedoch. Kraftwerke bilden auch die Hauptquelle für Staub (3). Eine geringere Auslastung wie etwa 1992 und 1998 reduziert die Staubkonzentration spürbar.

Demnach ergibt sich für die 18 Megacitys, deren Luftqualität die Forscher zuvor analysiert hatten, eine Tabelle, die Auskunft darüber gibt, wo die Menschen die schädlichste Luft atmen. Die höchste Zahl zusätzlicher Todesfälle aufgrund der Luftverschmutzung verzeichnet Karatschi: fast 15 000 im Jahr. Etwa 14 700 Menschen sterben in Dha-ka an den Folgen der belasteten Luft, 14 100 in Kairo, 11 500 in Peking und 10 500 in Neu-Delhi.

WELCHER SCHADSTOFF MUSS ZUERST REDUZIERT WERDEN?

In Los Angeles, New York oder Tokio wirkt sich die Luftverschmutzung dagegen längst nicht so drastisch aus. Hier liegen die Zahlen zusätzlicher Todesfälle unter 500. „Die Analyse zeigt eine eindeutige Tendenz: Das von der Luftverschmutzung ausgehende Gesundheitsrisiko ist in den Megastädten der Entwicklungsländer größer als in den Megastädten der Industrienationen“, sagt Bhola Ram Gurjar.

Die Forscher räumen ein, dass die Zahlen keine absolut sicheren Werte wiedergeben. Das derzeitige Modell geht davon aus, dass die gesamte Bevölkerung einer Megastadt den Luftschadstoffen im selben Maße ausgesetzt ist. Ferner verwendet das Modell Jahresdurchschnittswerte für die einzelnen Luftschadstoffe. Künftig wollen die Forscher jedoch monatliche, wöchentliche oder gar tägliche Schwankungen der Schadstoffkonzentration ebenso berücksichtigen wie die Zahl der Menschen, die den Schadstoffen tatsächlich ausgesetzt sind.

„Die Risikoschätzungen mögen nicht perfekt sein, doch wir sind der Meinung, dass sie bei der Aufstellung von Richtlinien zur Schadstoffkontrolle hilfreich sein können“, sagt Gurjar. Denn das Modell schlüsselt die Gesundheitsrisiken nach Schadstoffen auf: Es berücksichtigt das relative Risiko, also die Wahrscheinlichkeit einer Erkrankung oder eines Todesfalls, die sich ergibt, wenn die Konzentration eines Schadstoffs um einen Punkt auf der Ri-MAP-Skala ansteigt. Auf diese Weise ergeben sich für jeden Schadstoff Zahlen, wie stark er die Sterblichkeitsrate etwa aufgrund von Atemwegs- und Herz-Kreislauf-Erkrankungen erhöht oder zu



Kraftwerke blasen in Delhi den größten Teil mancher Schadstoffe in die Luft. Um die Zahl der Stromausfälle zu reduzieren, werden weitere geplant, wie etwa auf dem unbebauten Land im Vordergrund.

wie vielen Einweisungen in Krankenhäuser wegen chronischer obstruktiver Lungenerkrankungen er führt. In Karatschi und Dhaka sind demnach jeweils etwa 2100 Todesfälle auf Erkrankungen der Atemwege zurückzuführen. „Die Stadtbehörden könnten selbst solche Näherungswerte als Grundlage für Entscheidungen nutzen, welcher Schadstoff als Erster reduziert werden sollte.“

ANALYSE AUCH FÜR SCHWERMETALLE UND OZON

Zur Teststadt für das Ri-MAP-Modell wurde Neu-Delhi. Hier ergab die Analyse, dass die Zahl zusätzlicher Todesfälle aufgrund der Luftverschmutzung von 1998 bis 2002 stark anstieg. 2003 fiel sie plötzlich ab, behielt für einige Jahre einen konstanten Wert und steigt nun seit ein paar Jahren wieder stetig an.

„Der starke Rückgang im Jahr 2003 könnte darauf zurückzuführen sein, dass die Stadtverwaltung in diesem Jahr sämtliche Busse des öffentlichen Verkehrs von Diesel auf komprimiertes Erdgas umstellte“, sagt Gurjar. „Doch die

seither stark wachsende Zahl der Fahrzeuge insgesamt hat diese Verbesserung inzwischen wieder zunichte gemacht.“

Ihre Forschung möchten Gurjar und Lelieveld nun auf weitere Schadstoffe ausdehnen, Schwermetalle etwa, Ozon oder kleinste Staubpartikel, die in die menschliche Lunge gelangen können. Zu einem späteren Zeitpunkt, sagt Gurjar, müssten die Risikoschätzungen des Modells mit epidemiologischen Daten aus den Megastädten verglichen werden. „Eine derartige direkte Korrelation der Ri-MAP-Zahlen mit den tatsächlichen Todesstatistiken ist der härteste Testfall für ein solches Modell“, sagt Gurjar.

Würden die Vorhersagen des Modells durch einen solchen Vergleich bestätigt, wüchse vermutlich das Vertrauen der Stadtverwaltungen in die Prognosen. Denn die Ergebnisse der Modellrechnungen erwiesen sich damit als verlässliche Grundlage, um die Maßnahmen für eine gesündere Atemluft zu planen. Das käme nicht nur der Gesundheit zugute. Auch der fabelhafte Blick auf die Megastädte, der sich

beim Landeanflug bietet, würde dann durch weniger Dunst getrübt und ließe sich vielleicht sogar einmal klar und deutlich genießen. ◀

GLOSSAR

Ri-MAP

Das Modell ermöglicht eine Abschätzung, wie viele zusätzliche Todesfälle und Krankenhausaufenthalte auf einen bestimmten Luftschadstoff und die Summe aller Luftschadstoffe zurückzuführen sind.

Konzentrations-Wirkungs-Beziehung

Setzt eine bestimmte Schadstoffkonzentration in eine statistische Beziehung zu einer physiologischen Wirkung. So erkrankt ein gewisser Anteil der Bevölkerung bei einer Belastung mit einer bestimmten Feinstaubkonzentration an Atherosklerose.

Relatives Risiko

Es gibt an, um wie viel sich die Wahrscheinlichkeit, eine bestimmte Krankheit (etwa einen Herzinfarkt) zu bekommen, für Personen mit einem besonderen Risiko (etwa Raucher) im Vergleich zu Personen ohne dieses Risiko erhöht.