

**IN DIE ATMOSPHERE**

**UND WIEDER ZURÜCK**

IN DIE ATMOSPHERE – UND WIEDER ZURÜCK

# VON DATEN ZUM HANDELN

SANAM VARDAG & ANDRÉ BUTZ

**Um den menschengemachten Klimawandel abzuschwächen, ist es wichtig, nicht nur die Emissionen des Treibhausgases Kohlendioxid unabhängig messen zu können, sondern auch zu erkennen, wo, wann und in welchem Ausmaß es der Atmosphäre durch natürliche Prozesse wieder entnommen wird. Diesen Fragen gehen Umweltphysikerinnen und -physiker der Universität Heidelberg mithilfe sogenannter Vorwärts- und Rückwärtsmodelle nach. Wie sich die dabei gewonnenen Erkenntnisse in effizientes Klimahandeln überführen lassen, erforschen sie in einem interdisziplinären Projekt mit Kolleginnen und Kollegen aus den Gesellschafts- und Verhaltenswissenschaften.**

# D

Der Klimawandel findet nicht erst in der Zukunft statt, sondern bereits jetzt, wie nicht nur in immer kürzeren Abständen auftretende Extremwetterereignisse zeigen. Und es ist seit vielen Jahren, sogar seit Jahrzehnten klar, dass er hauptsächlich von menschengemachten Treibhausgasemissionen – zum überwiegenden Teil Kohlendioxid – verursacht wird und dass diese durch menschliches Handeln verschuldete Klimaänderung die natürliche Klimavariabilität deutlich übersteigt. Die künftige Intensität des Klimawandels wird sich nur abschwächen lassen, wenn es gelingt, die Konzentration von Kohlendioxid in der Atmosphäre zu senken. Unklar ist allerdings bislang, wo genau Kohlendioxid in welcher genauen Menge in die Atmosphäre gelangt und wo und wann es der Atmosphäre durch natürliche Prozesse wieder entnommen wird.

Wo das Treibhausgas emittiert wurde, ist für die globale Erwärmung physikalisch nicht relevant – umweltpolitisch aber ist es von großer Bedeutung, welches Land und welcher Akteur wie viel Kohlendioxid in die Atmosphäre abgibt: Die Emissionen und die Emissionsreduktion müssen überprüfbar und transparent sein, denn nur so kann die Weltgemeinschaft den Klimawandel effektiv bremsen. Der künftige Grad der Erwärmung ist darüber hinaus davon abhängig, welcher Anteil der Emissionen durch natürliche Senken wieder an Land und im Ozean gespeichert wird. Am Institut für Umweltphysik der Universität Heidelberg erforschen wir, wie wir die Kohlendioxidquellen und -senken besser verstehen, quantifizieren und kartieren können.

## Die Kohlendioxidquellen

Seit der Industrialisierung steigt die Menge an Kohlendioxid in der Atmosphäre und sorgt damit für einen globalen Anstieg der Temperatur – bereits heute liegt die weltweite Durchschnittstemperatur 1,5 Grad höher als in vorindustriellen Zeiten. Hauptverursacher sind fossile Brennstoffe, bei deren Verbrennung Kohlendioxid freigesetzt wird, das ursprünglich langfristig in der Erdkruste gespeichert war. Auf geologischen Zeitskalen betrachtet geschieht diese Freisetzung immens schnell. Hinzu kommen Landnutzungsänderungen, die auf globaler Skala netto Kohlendioxid in die Atmosphäre entlassen. Diese Kausalität ist seit Langem bekannt, dennoch stiegen die globalen Kohlendioxidemissionen in den letzten Jahrzehnten deutlich an.



**DR. SANAM VARDAG leitet am Institut für Umweltphysik (IUP) der Universität Heidelberg eine Forschungsgruppe, die sich mit der Simulation von Treibhausgasen in der Atmosphäre beschäftigt. Bevor sie 2020 Akademische Rätin am IUP wurde, war sie ab 2017 Geschäftsführerin des Heidelberg Center for the Environment (HCE) der Universität. Ihre Dissertation am IUP zu Messungen von Treibhausgasen und Isotopen wurde mit dem Umweltpreis der Viktor-und-Sigrid-Dulger-Stiftung ausgezeichnet. Sanam Vardags Forschungsinteresse gilt der Quantifizierung urbaner Treibhausgasflüsse und dem Prozessverständnis kontinentaler terrestrischer Flüsse.**

**Kontakt: [sanam.vardag@uni-heidelberg.de](mailto:sanam.vardag@uni-heidelberg.de)**

Erst im Jahr 2015 ist es gelungen, eine Absichtserklärung zur Reduktion des globalen Temperaturanstiegs zu erzielen: 195 Länder und die Europäische Union haben sich im Pariser Klimaabkommen darauf geeinigt, die Emissionen so zu reduzieren, dass der Anstieg der globalen Mitteltemperatur auf maximal 2 Grad, möglichst aber nicht mehr als 1,5 Grad Celsius beschränkt bleibt. Eine zentrale Komponente des Abkommens lautet „Messung, Verifizierung und Berichterstattung“ – englisch „Measurement, Verification and Reporting“, kurz MVR: Sie soll sicherstellen, dass die Maßnahmen zum Klimaschutz transparent und überprüfbar sind. Das ist wichtig, hat sich doch in der Vergangenheit gezeigt, dass die tatsächlichen Emissionen größer waren als von offizieller Seite berichtet. Es ist deshalb erforderlich, die anthropogenen, das heißt durch menschliches Handeln verursachten Emissionen unabhängig und wissenschaftsbasiert zu bestimmen.

Zum Abschätzen anthropogener Quellen und veränderter Landnutzungen werden häufig sogenannte Emissionsinventare verwendet, also wissenschaftliche Bestandsaufnahmen der Treibhausgasemissionen. Sie basieren auf Aktivitätsdaten, welche die Menge und Verteilung der Emissionen beeinflussen. Dazu zählen beispielsweise national exportierte und importierte Brennstoffe oder Datensätze, die es ermöglichen, Emissionen zeitlich und räumlich aufzugliedern und so eine bessere Auflösung und Verursacherzuordnung zu erhalten. Derartige Datensätze sind etwa Straßennetze, Verkehrsdaten oder Satellitenbilder. Welche Datensätze sich am besten eignen und wie sie zu gewichten sind, wird fortlaufend erforscht und

## Institut für Umweltphysik

Das Institut für Umweltphysik (IUP) der Universität Heidelberg wurde 1975 gegründet. Als eigener Forschungszweig ist die Umweltphysik in den 1950er-Jahren aus der Entwicklung und Anwendung kernphysikalischer Messmethoden entstanden, um das Klimasystem der Erde zu untersuchen. Damals wie heute beschäftigt sie sich aus einem physikalischen Blickwinkel mit Fragestellungen rund um den Fluss von Energie und Materie in unserer Umwelt. Erforscht werden die Physik von Transport- und Mischungsvorgängen sowie die Stoffumwandlung und der Energieaustausch innerhalb und zwischen einzelnen Umweltsystemen wie der Atmosphäre, der Landoberfläche, dem Ozean und anderen aquatischen Systemen. Zu den verwendeten Methoden gehören unter anderem Massen- und Optische Spektrometrie sowie Modelle zur Simulation von Massentransport auf lokalen bis globalen Skalen.

[www.iup.uni-heidelberg.de](http://www.iup.uni-heidelberg.de)

verbessert. Der Nachteil von Emissionsinventaren zur Abschätzung anthropogener Quellen sind Unsicherheiten, die für subnationale Skalen wie Bundesländer, Landkreise, Städte und kleinere Einheiten sehr groß sind.

### Natürliche Kohlendioxidsenken

Neben den Kohlendioxidquellen beeinflussen auch sogenannte natürliche Kohlendioxidsenken maßgeblich die Kohlendioxidkonzentration in der Atmosphäre: Sie nehmen anthropogenes Kohlendioxid auf und speichern es, wodurch sie den globalen Kohlendioxidanstieg in der Atmosphäre bremsen können. Solche Kohlendioxidreservoirs sind die Ozeane und die Landoberfläche, beispielsweise intakte Ökosysteme wie Moore oder Wälder. Im mehrjährigen Mittel entnehmen Kohlendioxidsenken der Atmosphäre ungefähr die Hälfte der anthropogenen Emissionen, wobei die Aufnahme von Jahr zu Jahr variiert, je nach vorherrschenden klimatischen Bedingungen.

Die künftige Aufnahmefähigkeit der natürlichen Kohlendioxid-speicher Ozean und Land wird darüber entscheiden, wie viel des emittierten Kohlendioxids in der Atmosphäre bleiben und dort zum Treibhauseffekt beitragen wird. Die Aufnahmefähigkeit der Senken vorherzusagen, ist aber wegen der komplexen biologischen, chemischen, geologischen und physikalischen Prozesse schwierig. Sehr viele Parameter spielen dabei eine Rolle, etwa Temperatur, Feuchte, chemische Zusammensetzung des Ozeans oder Typen der Vegetation. Erst wenn wir die Austauschprozesse zwischen der Atmosphäre und den Ozeanen beziehungsweise zwischen Atmosphäre und Landoberfläche und deren Einfluss auf das Klima verstehen, lässt sich die künftige Aufnahmefähigkeit natürlicher Senken zuverlässig abschätzen. In den letzten Jahren zeigt sich eine Tendenz, die auf eine abnehmende Wirkung der Senken hindeutet.

Um die komplexen Mechanismen besser zu verstehen, nutzt die Wissenschaft Computermodelle, die die wichtigsten Prozesse mit Gleichungen beschreiben und die transportierte Kohlendioxidmasse pro Zeit und Fläche für die Zukunft simulieren, fachsprachlich „Vorwärtsmodelle“ genannt. Landoberflächenmodelle simulieren den biogeochemischen und den hydrologischen Kreislauf abhängig von klimatischen Bedingungen und lokalen Gegebenheiten. Einen großen Einfluss auf die tatsächlichen Kohlendioxidflüsse haben Vegetationstypen, Temperatur und Bodenfeuchte; darüber hinaus gibt es viele weitere Einflussgrößen, die in Vegetationsmodelle eingebaut werden können. „Ozean-Vorwärtsmodelle“ simulieren analog den Austausch zwischen Atmosphäre und Ozean sowie die Transportprozesse innerhalb des Ozeans. Die chemischen und physikalischen Eigenschaften des Ozeans sowie die atmosphärische Dynamik und Konzentration beeinflussen den Austausch zwischen Ozean und Atmosphäre. Auch das muss im Computermodell berücksichtigt werden.

Um auf lokale Gegebenheiten und Feinheiten eingehen zu können, werden die Modelle meist in räumliche Gitter aufgeteilt. Zur Bestimmung der Kohlendioxidflüsse über große Regionen hinweg können Simulationen für Tausende von Gitterzellen durchgeführt werden. Um Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Boden- oder Wasserschichten abbilden zu können, haben die Modelle meist zusätzlich mehrere vertikale Schichten. Die Kohlendioxidflüsse in die Atmosphäre und wieder zurück ergeben sich durch Austauschprozesse zwischen den Schichten. Diese sind teils aus theoretischen Überlegungen, teils durch Messungen bestimmt. Je nach Anwendungsgebiet des Modells können unterschiedliche Prozesse wichtiger sein, weswegen es viele unterschiedliche Modelle mit unterschiedlichen Schwerpunkten und Qualitäten gibt.

Die Bestimmung der natürlichen Gesamtsenke anhand der Modelle wird dadurch erschwert, dass die Bruttoflüsse der beiden Speicher sehr hoch sind: Die globalen Landoberflächen-Flüsse durch Photosynthese (Aufnahme von Kohlendioxid) und Respiration (Abgabe von Kohlendioxid) sind circa 40 Mal so hoch wie die Nettosenke; beim Ozean ist der globale Fluss der Bruttoaufnahme und Bruttoabgabe von Kohlendioxid etwa 30 Mal so hoch wie die Nettosenke. In Konsequenz müssen die Aufnahme- und Abgabeprozesse sehr genau simuliert werden, um schließlich durch Bilanzierung der großen Bruttoflüsse die kleine Nettosenke richtig zu bestimmen.

### Direkte Kohlendioxidmessungen

Kombiniert man die anthropogenen Emissionen aus Emissionsinventaren mit den Senken der Landoberfläche und des Ozeans aus Vorwärtsmodellen, ergibt sich der in der Atmosphäre verbleibende Teil des anthropogenen Kohlendioxids. Er bestimmt die erwartete Konzentration in der Atmosphäre. Die aus Modellen gewonnenen Erkenntnisse lassen sich mit tatsächlichen Messungen vergleichen. Direkt in der Atmosphäre gemessen wird Kohlendioxid seit dem Jahr 1958, seither sind zahlreiche Messstandorte und Messtechniken hinzugekommen, die ein recht vollständiges Bild der momentanen Kohlendioxidkonzentration auf der Erde liefern.

Insgesamt zeigt sich, dass Simulation und Messung in den wichtigsten Punkten auf globaler Skala gut zusammenpassen. Beide zeigen den jahreszeitlichen Zyklus, den Anstieg von Kohlendioxid in der Atmosphäre sowie Jahr-zu-Jahr-Schwankungen. Dennoch bleibt auch auf globaler Skala eine Diskrepanz von rund zehn Prozent zwischen dem gemessenen jährlichen und dem vorwärts modellierten Kohlendioxidanstieg. Diese Diskrepanz wird als „globales Budget-Ungleichgewicht“ bezeichnet. Hauptursache sind unvollständig verstandene und ungenau charakterisierte Prozesse in den Modellen der Landoberfläche und des Ozeans. Auf subnationalen Skalen gibt es zudem große



**PROF. DR. ANDRÉ BUTZ** ist seit 2018 Professor für Atmosphärenphysik am Institut für Umweltp Physik (IUP) der Universität Heidelberg und seit 2021 Co-Direktor des Heidelberg Center for the Environment (HCE). Davor leitete er ab 2016 die Abteilung Fernerkundung am Institut für Physik der Atmosphäre des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) und war Professor an der Ludwig-Maximilians-Universität München. Seinen Schwerpunkt Treibhausgasmessungen entwickelte er im Rahmen einer Postdoc-Stelle am Netherlands Institute for Space Research und in einer Emmy-Noether-Nachwuchsgruppe am Karlsruher Institut für Technologie (KIT). Promoviert wurde André Butz mit einer Arbeit zur Photochemie der Stratosphäre in einem binationalen Cotutelle-Verfahren an der Universität Heidelberg und der Université Pierre et Marie Curie in Paris.

Kontakt: [andre.butz@uni-heidelberg.de](mailto:andre.butz@uni-heidelberg.de)

Unsicherheiten in den anthropogenen Emissionen. Aus diesen Gründen gibt es einen weiteren Ansatz: Er geht von Atmosphärenmessungen aus und schließt zurück auf die Emissionen – die „Rückwärtsmodelle“.

„Rückwärtsmodelle“ basieren auf Messungen der Kohlendioxidkonzentration in der Atmosphäre an verschiedenen Stellen der Erde. Die Messungen liefern Informationen darüber, wie viel Kohlendioxid in der lokalen Atmosphäre vorliegt. Sie lassen aber zunächst keine direkte Aussage darüber zu, wie viel Kohlendioxid an welcher Stelle emittiert oder aufgenommen wurde. Dazwischen liegt der meteorologische Transport von emittierten Kohlendioxidmolekülen in Raum und Zeit.

Um von Kohlenstoffkonzentrationen auf Kohlendioxidflüsse rückschließen zu können, benutzt man sogenannte Inversionsverfahren: In der Inversion wird berechnet, wie die wahrscheinlichste Verteilung der Kohlendioxidquellen und Kohlendioxidensenken war, sodass die gemessenen Kohlendioxidkonzentrationen erklärt werden können. Dazu werden die Konzentrationen im Modell mit einer angenommenen Verteilung der Quellen und Senken simuliert und die Simulation mit den Messdaten verglichen. Das Modell passt die räumliche und zeitliche Verteilung der Nettoflüsse dann so lange an, bis es die Messdaten möglichst gut gemäß einem zuvor festgelegten Optimierungskriterium erklärt. Dabei werden sowohl die Unsicherheiten der Messungen als auch die Unsicherheiten des Modells berücksichtigt. Die Inversion setzt also bei der atmosphärischen Messung an und schließt dann auf die Nettoflüsse.

Bei der Vorwärts-Modellierung werden die Prozesse explizit implementiert, deshalb sind auch Bruttoflüsse bekannt, beispielsweise durch Respiration und Photosynthese. Mit der Rückwärts-Modellierung lassen sich nur die Nettoflüsse bestimmen, die auf tatsächlich gemessenen Daten basieren. Die Kombination aus Vorwärts- und Rückwärts-Modellierung kann einen entscheidenden Mehrwert liefern: Prozessorientierte Systemkenntnis wird mit empirischer Evidenz räumlich und zeitlich aufgelöst zusammengebracht. Entscheidend ist, dass Rückwärtsmodelle mit „guten“ Daten gefüttert werden. Von prinzipiellem Vorteil sind möglichst viele und genaue Messdaten – wo es nur wenige Messungen gibt, sind die Kohlendioxidemissionen und Kohlendioxidflüsse nicht gut zu bestimmen.

#### **Dunkle Flecken auf der Landkarte**

In vielen Regionen der Erde ist am Boden wenig Messinfrastruktur vorhanden, beispielsweise in der südlichen Hemisphäre. Typischerweise sind dort auch die Vorwärtsmodelle schlechter: Sie wurden oft in der Nordhemisphäre entwickelt, getestet und kalibriert. Abhilfe können hier Satelliten schaffen, die vom Weltraum aus die Konzentration

#### **Heidelberg Center for the Environment**

Das Heidelberg Center for the Environment (HCE) vernetzt als einer von drei im Rahmen der Exzellenzstrategie geförderten interdisziplinären Inkubatoren der Universität Heidelberg die umweltorientierte Forschung. Das 2011 als Teil des Zukunftskonzepts der Universität gegründete Zentrum will über Fächer- und Disziplinengrenzen hinweg den existenziellen Herausforderungen und ökologischen Auswirkungen des natürlichen, technischen und gesellschaftlichen Wandels wissenschaftlich begegnen und so große gesellschaftliche Herausforderungen der Zukunft gestalten. Dabei setzt das HCE gezielt auf eine enge interdisziplinäre und integrative Zusammenarbeit, da die Komplexität und die kulturelle Gebundenheit der heutigen Umweltprobleme das Analyseraster einzelner Methoden oder Disziplinen sprengen. Mit ihren vielfältigen Einrichtungen und Kompetenzen in den Umweltwissenschaften tritt die Universität Heidelberg auch international als ein Ort hervor, an dem diese Gesamtsicht auf die Umwelt entwickelt und zugleich in die Lehre und den öffentlichen Diskurs eingebracht werden kann.

[www.hce.uni-heidelberg.de](http://www.hce.uni-heidelberg.de)

von Kohlendioxid in der Atmosphäre messen. Satellitenmessungen sind zwar weniger genau als Messungen am Boden, ermöglichen es aber, auch Kontinente mit wenig Messinfrastruktur zu untersuchen.

Am Institut für Umweltphysik der Universität Heidelberg nutzen wir Satellitendaten als Input für eine Inversion, die auch auf Kohlendioxidflüsse in abgelegenen Gebieten rückschließen lässt. Eine unserer aktuellen Arbeiten zeigt etwa: In den trockenen Gebieten Australiens, Südafrikas und Südamerikas tritt in der Atmosphäre ein Kohlendioxid-Puls am Ende der Trockenzeit auf. Über den Vergleich von Rückwärts- mit Vorwärtsmodellen konnten wir sicherstellen, dass wir nur Vorwärtsmodelle verwenden, die auch mit der empirischen Evidenz der Rückwärtsmodelle zusammenpassen. Diese Vorwärtsmodelle haben wir benutzt, um den Prozess zu identifizieren, der dem auffälligen Kohlendioxid-Puls zugrunde liegt.

Das Ergebnis: Der Kohlendioxid-Puls in die Atmosphäre am Ende der Trockenzeit entsteht, weil Mikroorganismen im Boden unmittelbar nach dem ersten, auf die Trockenheit folgenden Niederschlag sehr rasch organisches Material abbauen. Die Mikroorganismen setzen den Kohlendioxid-Puls frei, bevor die wachsenden Pflanzen im Zuge der Photosynthese damit beginnen, aus der Atmosphäre Kohlendioxid zu entnehmen. Dass dieser Prozess auf kontinentaler Skala von Bedeutung ist, war bisher nicht

INTO THE ATMOSPHERE AND BACK AGAIN

# FROM DATA TO ACTION

SANAM VARDAG &amp; ANDRÉ BUTZ

Climate gases such as carbon dioxide undergo continuous exchange processes between the Earth's atmosphere and the land and ocean surfaces. The exchange is driven by a complex interplay of a multitude of biogeochemical and physical processes. Today and in the foreseeable future, the natural balance is perturbed by mankind emitting fossil carbon dioxide, which drives climate change. Thus, to project the future climate and to effectively deploy emission reduction measures, it is pivotal to understand the back-and-forth of carbon dioxide – its release into and removal from the atmosphere – in detail and with accurate knowledge of the exchange processes and their sensitivities to climatic change. ●

DR SANAM VARDAG is a member of Heidelberg University's Institute of Environmental Physics (IUP), where she heads a research group that simulates greenhouse gases in the atmosphere. In 2020 she was promoted to the rank of "Akademische Rätin" at the IUP, having previously held the position of Executive Manager at the Heidelberg Center for the Environment (HCE) since 2017. She won the Environmental Award of the Viktor and Sigrid Dulger Foundation for her doctoral thesis at the IUP on the measurement of greenhouse gases. Sanam Vardag's research interests include the quantification of urban greenhouse gas fluxes and understanding the processes of continental terrestrial fluxes.

Contact: sanam.vardag@uni-heidelberg.de

PROF. DR ANDRÉ BUTZ joined Heidelberg University's Institute of Environmental Physics (IUP) in 2018 as Professor of Atmospheric Physics and has been Co-Director of the Heidelberg Center of the Environment (HCE) since 2021. He previously headed the Department of Atmospheric Remote Sensing at the Institute of Atmospheric Physics of the German Aerospace Center (DLR) from 2016 onward and held a professorship at LMU Munich. He developed his area of focus, greenhouse gas measurements, during his postdoc work at the Netherlands Institute for Space Research and in an Emmy Noether Junior Research Group at the Karlsruhe Institute of Technology (KIT). André Butz earned his doctorate with a thesis on stratospheric photochemistry in a binational Cotutelle programme at Heidelberg University and Université Pierre et Marie Curie in Paris.

Contact: andre.butz@uni-heidelberg.de

**“The combination of forward and backward modelling can offer a crucial benefit: process-oriented system knowledge is combined with empirical evidence, with the results mapped across space and time.”**

bekannt. Die Satellitendaten zeigen aber deutlich, dass die Kohlendioxid-Pulse die Jahr-zu-Jahr-Variabilität kontinentaler Regionen gerade wegen ihrer Abhängigkeit von schwankenden klimatischen Bedingungen dominieren können.

### Messungen in Städten

Städte sind ein weiteres Beispiel für Regionen, deren Kohlendioxidflüsse unsicher sind. Das mag überraschen, denn in Städten sollte genug Infrastruktur vorhanden sein, um vor Ort Messungen vornehmen zu können, zumal Städte für einen großen Teil der anthropogenen Emissionen verantwortlich sind. Es wäre also naheliegend, die Stadtmissionen genau zu bestimmen, um die Städte in ihren Bestrebungen zum Klimaschutz zu unterstützen. Traditionell wurden Messstationen aber an Orten errichtet, die weit weg von Städten liegen. Der Grund für diese Standortwahl ist, dass sowohl die Emissionslandschaft als auch die meteorologischen Bedingungen in Städten sehr komplex und heterogen sind. Um Emissionen aus Städten also unabhängig bestimmen zu können, braucht es möglichst viele und genaue Messungen im Stadtgebiet selbst. Hinzukommen muss ein hochaufgelöstes und genaues meteorologisches Modell, um die Konzentrationsmessungen quantitativ in einer Inversion zu verwenden.

Aufgrund ihrer Verantwortung für Kohlendioxidemissionen rücken Städte immer stärker in den Fokus. Auch die Städte selbst sind sich dieser Verantwortung oft bewusst und haben sich ehrgeizige Ziele gesetzt, um ihre Emissionen drastisch zu reduzieren. Wie sich eine Emissionsreduktion am effizientesten unabhängig nachweisen lässt, untersuchen wir im Rahmen des Projekts „Integriertes Treibhausgas-Monitoring-System“. Dabei werden unterschiedliche potenzielle Treibhausgas-Messnetzwerke im Rückwärtsmodell verglichen, um – je nach Stadt – die effizientesten Monitoring-Methoden zu bestimmen. Sobald die Messungen etabliert sind, lassen sich Rückwärtsmodelle nutzen, um Kohlendioxidemissionen im Stadtgebiet zu quantifizieren und deren Verursacher zu identifizieren.

### Von Klimadaten zum Klimahandeln

Bleibt die Frage, ob die unabhängig und wissenschaftsbasiert ermittelten Informationen zur Kohlendioxidemission zum Hebel werden können, um den Klimawandel effektiv zu bekämpfen. Werden wir Emissionen schneller reduzieren, wenn wir unseren Erfolg nachweisen können? Oder würde es uns mehr anspornen, zusätzlich zum Wetterbericht auch einen Kohlendioxidbericht auf das Handy zu laden? Solche Fragen lassen sich nur interdisziplinär erforschen, deshalb wollen wir ihnen in einem breit interdisziplinär angelegten Ansatz mit Forschern und Forscherinnen aus verschiedenen natur-, gesellschafts- und verhaltenswissenschaftlichen Bereichen nachgehen.

Unsere Hypothese ist, dass neuartige, hochauflösende Daten zu Kohlendioxidemissionen und -konzentrationen eine neue Unmittelbarkeit des eigenen Beitrags zum Klimawandel bei Bürgern und Bürgerinnen, Städten, Unternehmen und anderen lokalen Akteuren schaffen. Bisher wird der Klimawandel oftmals als entfernt wahrgenommen, und bei Handlungsentscheidungen spielt die eigene Kohlendioxidemission eine untergeordnete Rolle. Oft erscheint die Wirkung auf das Klima abstrakt und im Vergleich zur globalen Herausforderung klein. Neue Technologien im Bereich der Kohlendioxidmessung und -modellierung werden es bald erlauben, Kohlendioxidverteilungen mit innerstädtischer Auflösung besser zu bestimmen sowie einzelne große Emittenten direkt aus dem All mit bildgebenden Satelliten zu überwachen. Damit ergibt sich eine neue, unmittelbare Verbindung zwischen lokalem Handeln und dessen Konsequenzen für die Kohlendioxidkonzentrationen in der Atmosphäre.

In unserem Projekt wollen wir die Wirkmechanismen aufklären, wie diese hochaufgelösten Kohlendioxiddaten zu zielgerichtetem Klimahandeln führen. Dabei stehen wieder Städte im Mittelpunkt, da sie maßgeblich zur globalen Kohlendioxidemission beitragen, oft bereits ambitionierte Klimaschutzpläne erstellt haben, im Wettbewerb mit anderen stehen und einem zunehmenden Nachweisdruck unterliegen. Auch individuelle Verhaltensmechanismen wollen wir untersuchen, um die Daten möglichst wirkmächtig für die Reduktion von Kohlendioxidemissionen zuschneiden zu können. ●

**„Es ist erforderlich, die anthropogenen, das heißt durch menschliches Handeln verursachten Emissionen unabhängig und wissenschaftsbasiert zu bestimmen.“**