

STADT

LAND

KLIMA

STADT, LAND, KLIMA

MESSEN FÜR EUROPA

INGEBORG LEVIN & SAMUEL HAMMER

Klimapolitische Maßnahmen sollen die Emissionen langlebiger Treibhausgase verringern, um die nicht mehr zu leugnenden Konsequenzen des Klimawandels zu mildern. Ob diese Maßnahmen wirklich greifen, muss auf der globalen, aber auch auf der nationalen und lokalen Skala unabhängig überprüft werden. Dass eine solche unabhängige Überprüfung tatsächlich möglich ist, haben Messergebnisse gezeigt, die an der Universität Heidelberg im Rahmen einer neuen europäischen Forschungsinfrastruktur erzielt wurden. Für diese ICOS-Infrastruktur baut die Universität Heidelberg ein neues zentrales Radiokohlenstoff-Labor auf, das Analysen für ein geplantes Messnetz aus 40 Stationen in Europa, den USA und Asien durchführen wird.

D

Die Menschheit steht vor einer großen Herausforderung: Die Konzentrationen von Kohlendioxid (CO_2) und anderen Treibhausgasen wie Methan (CH_4) und Lachgas (N_2O) in der Atmosphäre steigen an. Die natürlichen globalen Stoffkreisläufe werden massiv vom Menschen gestört. Die Konsequenz? Das Klima erwärmt sich. Bekannt ist der natürliche Treibhauseffekt von Kohlendioxid bereits seit 1896, als der schwedische Nobelpreisträger Svante Arrhenius seine Berechnungen über „Den Einfluss der Kohlensäure in der Luft auf die Bodentemperatur“ veröffentlichte. Unübersehbare Zeichen für einen menschengemachten Anstieg der Temperatur auf der Erde als Folge anthropogener Treibhausgasemissionen und der vermehrten Nutzung ursprünglicher Waldflächen für die Landwirt-

schaft gibt es seit den 1980er-Jahren. Dennoch wurden dem steigenden Energiebedarf und Verbrauch an natürlichen Ressourcen, Wasser oder Lebensmitteln besonders in den hochentwickelten Industriestaaten keine wirksamen Grenzen gesetzt.

Neue europäische Forschungsinfrastruktur

Erst mit dem Pariser Klima-Abkommen 2015 und der Einigung auf das ehrgeizige Ziel, die zukünftige Klimaerwärmung auf weniger als $+2^\circ\text{C}$ zu begrenzen, versucht man nun weltweit, die Situation „wenige Minuten vor Zwölf“ in den Griff zu bekommen. Zahlreiche klimapolitische Maßnahmen streben an, die Emissionen langlebiger Treibhausgase wie CO_2 , CH_4 und N_2O zu verringern, um so die nicht mehr zu leugnenden Konsequenzen des Klimawandels abzumildern. Ob diese Maßnahmen wirklich greifen, muss auf globaler, aber auch auf der nationalen und lokalen Skala auf unabhängige Weise überprüft werden. Hierzu können präzise Beobachtungen von Treibhausgaskonzentrationen und -flüssen herangezogen werden. So beinhaltet die neueste Vereinbarung der UN-Klimakonferenz in Bonn 2017 (COP 23) eine explizite neue Klausel: Danach sollen den bislang nur auf statistischen Daten beruhenden jährlichen Berichten über nationale Treibhausgasemissionen auch direkte Messungen zur Seite gestellt werden.

„Bekannt ist der natürliche Treibhauseffekt von Kohlendioxid bereits seit mehr als hundert Jahren.“

Unter anderem auch, um dieser Aufgabe in Europa gerecht zu werden, wurde in den letzten zehn Jahren eine neue europäische Forschungsinfrastruktur, die „Integrated Carbon Observation System Research Infrastructure“, kurz ICOS RI, aufgebaut. Im Rahmen von ICOS werden langfristig hochpräzise und international vergleichbare Treibhausgasmessungen in der Luft, auf dem Land und in den Ozeanen durchgeführt. Diese Messungen bilden die Grundlage für ein besseres Verständnis der komplexen Wechselwirkungen zwischen dem Klima einerseits und Biosphäre, Hydrosphäre sowie Atmosphäre andererseits. Die vielfältigen Austauschprozesse von Treibhausgasen im Klimasystem Erde werden durch sie erforschbar und sie sind die beste Investition, um Überraschungen zu vermeiden und die Unsicherheiten der Vorhersagen zur zukünftigen Wechselwirkung von Klima, Ökosystemen und Mensch zu verringern.

Neben Messungen der Austauschflüsse in allen wichtigen Ökosystemen an Land und in den Europäischen Randmeeren soll ein dichtes Netz an atmosphärischen Beobachtungen den Kontinent von Ost nach West und von Nord nach Süd überziehen. Die Atmosphäre integriert alle Signale bodennaher Quellen und Senken, sie verliert keine Emissionen – auch nicht solche, welche in den Berechnungen der Statistiker vielleicht nicht berücksichtigt wurden. Zusammen mit regionalen Modellen, die den Transport der Gase in der Atmosphäre beschreiben, können aus den gemessenen atmosphärischen Konzentrationsverteilungen die Stärken der Quellen und Senken berechnet werden. Je dichter das Beobachtungsnetz und je feiner aufgelöst das Transportmodell, umso detaillierter können die Emissionen nachgebildet

werden. Prinzipiell ist es mit diesem System von Messungen und Modellen möglich, beispielsweise die Gesamtemissionen einer Stadt wie Heidelberg oder der Metropolregion Rhein-Neckar zu bilanzieren.

Die Signale biosphärischer und anthropogener Quellen

Es gibt nur ein Problem: Was die Wissenschaft, aber auch die Politik, eigentlich interessiert, ist die Frage, welcher Anteil der gemessenen CO₂-Konzentrationsvariationen in der Atmosphäre von Verbrennungsprozessen, etwa aus den Heizungen der Haushalte, aus Kohlekraftwerken oder aus dem Verkehr, stammen und welcher Anteil auf die natürliche Atmung der Ökosysteme zurückzuführen ist. Für einen Nachweis der Minderung menschengemachter Emissionen ist nämlich eine differenzierte Betrachtung von CO₂ aus verschiedenen Quellen nötig. Pflanzen nehmen im Sommer und am Tag große Mengen von Kohlendioxid bei der Photosynthese auf und atmen einen Teil davon nachts wieder aus. Diese biogenen Flüsse sind meist für den größten Teil der beobachteten CO₂-Variationen in der bodennahen Atmosphäre verantwortlich, auch in Ballungsgebieten wie der Metropolregion Rhein-Neckar.

Die Karte im Grafikindex nach S. 149 zeigt eine theoretische Momentaufnahme der aus Emissionsstatistiken und Modellen der Biosphäre zusammengestellten Informationen über die Verteilung von CO₂-Flüssen in Europa an einem Nachmittag im Sommer: Grün und Blau markiert sind die Flächen, auf denen netto die CO₂-Aufnahme überwiegt, braun und rot die Gebiete, in denen netto die CO₂-Abgabe überwiegt. Große Ballungsgebiete wie London, Paris, Berlin und das Ruhrgebiet treten als große rote Flecken auf. Nicht weit entfernt davon finden sich grüne bis dunkelblaue Flächen, die eine starke CO₂-Aufnahme durch Pflanzen anzeigen. Diese beiden Komponenten, also biogene und fossile CO₂-Flüsse, durch direkte Messungen voneinander zu separieren, ist eine der großen Herausforderungen der Europäischen Kohlenstoffbilanzierung.

Radiokohlenstoffmessungen im atmosphärischen CO₂

Dieser Aufgabe stellt sich seit Jahrzehnten die Arbeitsgruppe Kohlenstoffkreislauf am Institut für Umweltphysik der Universität Heidelberg. Hilfe bekam sie durch das Radiokohlenstofflabor, das der Gründungsdirektor des Instituts, Karl Otto Münnich, seit den 1960er Jahren etablierte. Radiokohlenstoffmessungen im atmosphärischen CO₂ sind der Schlüssel zur Unterscheidung von CO₂ aus biogenen und fossilen Quellen.

Radiokohlenstoff (¹⁴C) ist ein natürliches radioaktives Isotop des Kohlenstoffs. Es wird ständig in der oberen Atmosphäre durch Reaktion von Neutronen mit den Stickstoffatomen in der Luft gebildet. Oxidiert zu ¹⁴CO₂ nimmt es wie die übrigen CO₂-Moleküle, die stabilen Kohlenstoff enthalten, an allen Austauschprozessen im Kohlenstoffkreislauf teil.



DR. INGEBORG LEVIN hat in Heidelberg Physik studiert und nach ihrer Doktorarbeit am Institut für Umweltphysik die Arbeitsgruppe Kohlenstoffkreislauf aufgebaut. Ziel ihrer Forschung ist die Untersuchung von Stoffkreisläufen langlebiger Treibhausgase mit Hilfe von Isotopenmessungen und radioaktiven Tracern. Ingeborg Levin hat Pionierarbeit geleistet auf dem Gebiet der systematischen Bestimmung von fossilem CO₂ über hochpräzise atmosphärische ¹⁴C-Messungen. Seit mehr als zehn Jahren ist sie maßgeblich daran beteiligt, die Europäische Forschungsinfrastruktur ICOS mit dem Zentralen Radiokohlenstofflabor in Heidelberg aufzubauen.

Kontakt: ingeborg.levin@iup.uni-heidelberg.de

„Im Rahmen von ICOS – einer neuen, in den letzten zehn Jahren aufgebauten europäischen Forschungsinfrastruktur – erfolgen langfristig hochpräzise und international vergleichbare Treibhausgasmessungen in der Luft, auf dem Land und in den Ozeanen.“



DR. SAMUEL HAMMER hat in Heidelberg Physik studiert und wurde als Mitglied der Arbeitsgruppe Kohlenstoffkreislauf über Quellen und Senken des atmosphärischen Wasserstoffs promoviert. Anschließend leitete er das Treibhausgas-Labor des Instituts für Umweltphysik und etablierte dort ein spektroskopisches in-situ-Messverfahren, welches neben Treibhausgasen auch die präzise Messung von stabilen CO₂-Isotopen ermöglicht. Seit dem Jahr 2016 leitet Samuel Hammer das Zentrale Radiokohlenstofflabor der Europäischen Forschungsinfrastruktur ICOS.

Kontakt: samuel.hammer@iup.uni-heidelberg.de

„Unser Messbeispiel aus Heidelberg hat dazu beigetragen, dass nun in Europa und auf anderen Kontinenten, in den USA und Asien, neue Messnetze aufgebaut werden.“

Da ^{14}C radioaktiv ist und im Mittel nach 8.000 Jahren zerfällt, kann man über Messungen des ^{14}C -Gehalts von organischem Material wie Knochen oder Holz das Alter bestimmen – bekannt als Radiokohlenstoff-Datierungsmethode.

Die moderne Kohlenstoffkreislauf-Forschung nutzt die Tatsache, dass atmosphärisches Kohlendioxid und damit auch der Kohlenstoff, der von Pflanzen ein- und ausgeatmet wird, „modern“ ist, also einen natürlichen atmosphärischen Anteil von ^{14}C enthält. Dahingegen findet man in fossilen Brennstoffen wie Kohle, Erdöl und Erdgas praktisch kein ^{14}C mehr, denn der ursprünglich bei der Bildung dieser Substanzen aufgenommene Radiokohlenstoff ist über die Jahrmillionen ihrer Lagerung im Erdinneren längst zerfallen. Daher enthält das CO_2 , welches aus der Verbrennung dieser fossilen Brennstoffe entsteht, kein ^{14}C . Dies ist die wichtige Markierung, die es für uns unterscheidbar macht von modernem CO_2 . Messen wir also $^{14}\text{CO}_2$ an einer Luftprobe aus einer durch

fossile Quellen stark beeinflussten Region und vergleichen dies mit dem in einer weitestgehend sauberen Region, zum Beispiel an der Messstelle des Umweltbundesamtes auf dem Schauinsland im Schwarzwald, können wir aus der Differenz dieser beiden Messungen direkt den Überschuss von fossilem CO_2 in der verschmutzten Region bestimmen.

Langzeitmessungen in Heidelberg

Bereits seit den 1980er-Jahren messen wir den Radiokohlenstoffgehalt im atmosphärischen CO_2 auf dem Campus der Universität Heidelberg im Neuenheimer Feld parallel zur Gesamtkonzentration von Kohlendioxid. Diese hat in Heidelberg, wie überall weltweit, in den letzten 30 Jahren um mehr als 15 Prozent zugenommen. Die ^{14}C -Ergebnisse zeigen uns, dass der Anteil an fossilem CO_2 auf dem Campus im Winter während der Heizperiode oft um einen Faktor 10 höher ist als auf dem Schauinsland im Schwarzwald. Im Sommer überwiegt die biogene CO_2 -Komponente, auch an unserer Messstelle auf dem Campus, aber der fossile Anteil liegt immer noch bei etwa einem Drittel der Winterwerte. Interessant ist aber, dass wir mit unseren Langzeitmessungen des fossilen CO_2 in Heidelberg in den letzten zehn Jahren im Mittel eine Verringerung des fossilen CO_2 -Anteils

Physikalische Untersuchung des Systems Erde

Das Institut für Umweltphysik (IUP) wurde 1975 an der Universität Heidelberg gegründet. Als eigener Forschungszweig ist die Umweltphysik beginnend in den 1950er-Jahren aus der Entwicklung und Anwendung kernphysikalischer Messmethoden entstanden, um das System Erde zu untersuchen. Damals wie heute beschäftigt sich die Umweltphysik mit Fragestellungen rund um den Fluss von Energie und Materie in unserer Umwelt. Das Wort Physik weist dabei auf den Blickwinkel hin, unter dem Umweltprozesse betrachtet werden.

Die Forschungsaktivitäten am IUP erstrecken sich auf ein weites Themenfeld – sowohl hinsichtlich der untersuchten Umweltbereiche als auch der verwendeten Untersuchungsmethoden. Erforscht werden die Physik von Transport- und Mischungsvorgängen sowie die Stoffumwandlung und der Energieaustausch innerhalb und zwischen einzelnen Umweltsystemen wie der Atmosphäre, dem Boden und dem Wasserkreislauf. Zu den verwendeten Methoden gehören unter anderem die Massenspektrometrie, die Gaschromatographie, die Spektroskopie und die Fernerkundung von Satelliten aus oder mittels Bodenradar sowie die Bildverarbeitung und die Modellierung.

www.iup.uni-heidelberg.de

TOWN, COUNTRY, CLIMATE

MEASURING FOR EUROPE

INGEBORG LEVIN & SAMUEL HAMMER

A drastic reduction in the emission of greenhouse gases (GHG) such as carbon dioxide (CO_2) and methane (CH_4) is required to stop further increases of their concentration in the global atmosphere and limit the future man-made temperature rise on Earth to less than $+2^\circ\text{C}$. At the Conference of Parties in Paris 2015 (COP 21), the signatory nations therefore committed themselves to a drastic reduction of carbon dioxide (CO_2) and other GHG emissions. At the Bonn conference in 2017 (COP23), they further agreed that this process should be accompanied by a direct observation system of GHG fluxes and concentration changes in the atmosphere, because this would provide the ultimate proof that emissions have indeed been reduced.

In order to pursue this goal, and to monitor, understand and quantify potential future changes in ecosystems as a consequence of climate change, the Integrated Carbon Observation System Research Infrastructure (ICOS RI) was established in Europe. The ICOS network consists of more than 100 observational sites in ecosystems, over the oceans and in the atmosphere. The Central Radiocarbon Laboratory for ICOS was established at Heidelberg University's Institute of Environmental Physics (IUP). The laboratory measures the radiocarbon (^{14}C) content of CO_2 in samples collected from the entire European network of atmospheric stations. This will allow us to estimate the regional fossil fuel CO_2 component and consequently to distinguish CO_2 signals originating from biogenic sources from those of fossil fuel emissions.

This ^{14}C -based methodology developed at IUP uses the fact that fossil CO_2 is free from ^{14}C . The $^{14}\text{CO}_2$ data in ICOS will provide key information on future changes in anthropogenic CO_2 emissions. The proof of concept at the IUP was successful: Our observations show that fossil CO_2 emissions in Rhine-Neckar county have decreased by about 20% since 1990. This finding is in line with officially reported emission reductions in our region. ●

DR INGEBOURG LEVIN studied physics in Heidelberg and, following her doctoral thesis, set up the Carbon Cycle research group at the Institute of Environmental Physics. She is investigating the biochemical cycles of persistent greenhouse gases using isotope measurements and radioactive tracers. Ingeborg Levin has done pioneering work in systematically determining fossil CO₂ using high-precision atmospheric ¹⁴C measurements. For more than ten years now, she has played a major role in establishing the European Research Infrastructure ICOS with the Central Radiocarbon Laboratory in Heidelberg.

Contact: Ingeborg.Levin@
iup.uni-heidelberg.de

DR SAMUEL HAMMER studied physics in Heidelberg and earned his PhD as a member of the Carbon Cycle research group with a thesis on the sources and sinks of atmospheric hydrogen. He went on to head the greenhouse gas laboratory of the Institute of Environmental Physics, establishing a spectroscopic in-situ procedure that not only permits a precise measurement of greenhouse gases concentrations, but also of stable isotopes in CO₂. Samuel Hammer has been heading the Central Radiocarbon Laboratory of the European Research Infrastructure ICOS since 2016.

Contact: Samuel.Hammer@
iup.uni-heidelberg.de

“Our sample measurements in Heidelberg have initiated the installation of new measuring networks in Europe and on other continents, for example in the USA and in Asia.”

„Die Entwicklung der Emissionsreduktionen in Europa werden wir in den nächsten Jahrzehnten mit unserem ICOS-Radiokohlenstofflabor begleiten.“

nachweisen können. Dies ist ein sehr wichtiges Ergebnis, denn es deckt sich mit den Angaben der Verringerung der fossilen CO₂-Emissionen in Heidelberg und dem Rhein-Neckar-Kreis, dem hauptsächlichen Einzugsgebiet unserer Messungen. Das Ergebnis zeigt, dass man tatsächlich durch atmosphärische Messungen die im internationalen Klimaabkommen geforderte unabhängige Überprüfung von Emissionsminderungen erreichen kann – in unserem Beispiel allerdings erst einmal nur für ein recht begrenztes Gebiet. Dennoch, dieses Beispiel aus Heidelberg hat dazu beigetragen, dass nun in Europa und auf anderen Kontinenten, in den USA und Asien, neue Messnetze aufgebaut werden. Für die ICOS-Infrastruktur hat die Universität Heidelberg die Mittel erhalten, ein neues zentrales Radiokohlenstoff-Labor aufzubauen, welches die ¹⁴C-Analysen für ein geplantes Netz aus 40 Stationen in Europa durchführen soll.

Ein neues Radiokohlenstoff-Labor

Die Messung von ¹⁴C im atmosphärischen CO₂ ist keine Aufgabe, die durch ein Standard-Messgerät einfach erledigt werden kann: Nur eines von tausend Milliarden Atomen in einer modernen Kohlenstoffprobe ist ein ¹⁴C-Atom. Um die oben skizzierte Methode sicher anwenden zu können, müssen wir das ¹⁴C/C Verhältnis von 10⁻¹² auf wenige Promille genau messen. Karl Otto Münnich hat in den 1960er Jahren in seinem Labor das ¹⁴C über den radioaktiven Zerfall gemessen. Hierzu brauchte es ein von Höhenstrahlung und anderer störender Radioaktivität gut abgeschirmtes Messlabor, große Proben und lange Messzeiten. Diese hochpräzise Messmethode, die sogenannte low-level-counting-Methode, wird in Heidelberg auch im neuen ICOS-Labor noch immer angewandt, denn an atmosphärischem CO₂ herrscht kein Mangel und die Methode liefert

nach wie vor höchste Präzision. Ein modernes ¹⁴C-Labor misst heutzutage allerdings ¹⁴C nicht mehr über seinen radioaktiven Zerfall, sondern massenspektrometrisch, genauer gesagt über die Beschleunigermassenspektrometrie. Dabei sorgt der Beschleuniger dafür, dass störende Atome oder Moleküle mit Masse 14 aus dem Probenstrahl ausgefiltert werden. Mit dieser Methode können Proben im Milligrammbereich auf ihren ¹⁴C-Gehalt analysiert werden – mit einer Präzision, die der low-level-counting-Methode vergleichbar ist. Anstelle von CO₂ aus zwanzig Kubikmetern Luft braucht sie nur wenige Liter.

Das neue ICOS-Radiokohlenstofflabor, welches Ende 2016 im Mathematikum B in Heidelberg feierlich übergeben wurde und im Herbst 2017 den Namen „Karl Otto Münnich Radiokohlenstofflabor“ erhielt, ist ausgerüstet mit modernsten teilautomatisierten Aufbereitungsmethoden. Sie erlauben es, bis zu 2.000 ¹⁴C-Proben im Jahr zu bearbeiten. Die Beschleunigermassenspektrometer-Messung erfolgt im Klaus-Tschira-Labor in Mannheim. Das Atmosphären-Messnetz von ICOS umfasst derzeit erst knapp zwanzig Messstationen in meist ländlichen Gebieten, wobei besonders der Osten und Süden Europas noch große weiße Flecken aufweisen. Mit neuen Forschungsprojekten soll der Schwerpunkt für ¹⁴CO₂-Messungen aber in Zukunft auch auf große Ballungsräume und sogenannte Megastädte gelegt werden. Dort entstehen weltweit etwa 70 Prozent der fossilen CO₂-Emissionen, und dort liegen auch die derzeit größten Einsparpotenziale für Treibhausgasemissionen. Die hoffentlich positive zukünftige Entwicklung der Emissionsreduktionen werden wir in Europa in den nächsten Jahrzehnten mit unserem ICOS-Radiokohlenstofflabor begleiten. ●