REGIO BASILIENSIS 63/1 2022 S. 65-74

Gesundheitseffekte und Zusammensetzung von Feinstaub und urbane CO_2-Emissionen: Forschungsschwerpunkte in den Atmosphärenwissenschaften am Departement Umweltwissenschaften der Universität Basel

Markus Kalberer, Roland Vogt, Nicolas Bukowiecki, Josef Zhang, Stavros Stagakis, Christian Feigenwinter, Günter Bing, Eberhard Parlow, Steve Campbell, Kate Wolfer, Alois Schäuble, Battist Utinger, Alexandre Barth, Julian Resch & Benjamin Gfeller

Zusammenfassung
In der Forschungsgruppe Atmosphärenwissenschaften am Departement Umweltwissenschaften der Universität Basel werden sowohl chemische als auch physikalische Prozesse in der Atmosphäre erforscht. Einerseits untersuchen und quantifizieren wir diejenigen Feinstaub-Quellen und chemischen Komponenten unserer Umgebungsluft, welche zur Toxizität von verschmutzter Luft beitragen und welche bis heute immer noch schlecht erforscht sind. Diese Arbeiten werden sowohl in Laborexperimenten wie auch in Feldversuchen durchgeführt und erfolgen auch in Zusammenarbeit mit Zellbiologen, mit denen wir die schädlichen biologischen und toxikologischen Mechanismen identifizieren. Andererseits untersuchen wir Klimaeffekte an städtischen Standorten, wobei wir in Basel und anderen Städten mit Hilfe von langjährigen Messreihen und Modellen die Strahlungsbilanz und die lokalen Kohlendioxid-Flüsse und -Emissionen quantifizieren. Diese sind vor allem für Städte mit ihrer komplexen Umgebung nur unzureichend bekannt.

1 Einleitung

In den Atmosphärenwissenschaften werden physikalische und chemische Vorgänge in der Atmosphäre mittels Feldbeobachtungen, Laborexperimenten und Computermodellen untersucht. Meteorologische und klimatologische Fragestellungen stehen hier oftmals im Vordergrund, ebenso wie die Untersuchung von Prozessen, die bei der Entstehung von Luftverschmutzung eine Rolle

Adresse der Autoren: Markus Kalberer, Roland Vogt, Nicolas Bukowiecki, Josef Zhang, Stavros Stagakis, Christian Feigenwinter, Günter Bing, Eberhard Parlow, Steve Campbell, Kate Wolfer, Alois Schäuble, Battist Utinger, Alexandre Barth, Julian Resch & Benjamin Gfeller, Departement Umweltwissenschaften, Universität Basel, Klingelbergstr. 27, CH-4056 Basel, Schweiz; E-Mail: markus.kalberer@unibas.ch

spielen. Die Forschungsgruppe Atmosphärenwissenschaften am Departement Umweltwissenschaften der Universität Basel ist in zwei Bereichen aktiv: Einerseits wird die Bildung, chemische Zusammensetzung und Toxizität von Feinstaub in Labor- und Feldversuchen untersucht, andererseits entwickeln wir Mess- und Modelliermethoden zur detaillierten Quantifizierung von Kohlendioxid (CO_2) -Flüsse und Emissionen im komplexen städtischen Umfeld, wozu die langjährigen CO_2- und Strahlungs-Messreihen der Universität Basel eine weltweit einmalige Grundlage bieten.

1.1 Forschungsschwerpunkt Feinstaub

Feinstaub ist diejenige Komponente in verschmutzter Luft, welche am meisten gesundheitsgefährdend ist. Die Weltgesundheitsorganisation WHO schätzt, dass jährlich ca. 3 Millionen Menschen aufgrund von Luftverschmutzung vorzeitig sterben (*WHO* 2016). Ungefähr 90 % dieser Todesfälle sind dabei auf eine erhöhte Konzentration von Feinstaubpartikel in verschmutzter Luft zurückzuführen, und die übrigen 10 % auf Spurengase wie Ozon und Stickoxide. Seit über drei Jahrzehnten zeigt eine Vielzahl epidemiologischer Studien übereinstimmend einen klaren Zusammenhang zwischen erhöhter Konzentration von Feinstaub in der Atemluft und erhöhter Mortalität und Morbidität (*Dockery* et al. 1993). Dies hat in vielen Ländern zur Einführung von Feinstaubgrenzwerten geführt, welche die maximal erlaubte Feinstaub Massen-Konzentration in der Luft festlegt. Feinstaub-Partikel können ganz unterschiedliche Grössen haben, von einigen wenigen Nanometern bis zu ca. 100µm, wobei nur Partikel kleiner als 10µm in unsere Atemwege gelangen und deshalb besonders gesundheitsgefährdend sind. In der Schweiz werden seit 1998 in der Luftreinhalteverordnung Grenzwerte für die gesamte Masse von Feinstaubpartikeln mit einem Durchmesser kleiner als 10µm (PM10) festgelegt, seit 2018 auch für Durchmesser kleiner als 2.5µm (PM2.5).

Vor allem in städtischer Umgebung gibt es eine Vielzahl von Quellen, welche zur gesamten Feinstaubbelastung beitragen, so z. B. Verkehr, Heizungen, Industrie aber auch Landwirtschaft und natürliche Quellen. Der weitaus grösste Anteil der Feinstaubmasse in der Atmosphäre wird nicht direkt als Partikel in die Atmosphäre emittiert, sondern wird erst durch chemische, meist sonnenlichtinduzierte Reaktionen in der Atmosphäre aus gasförmigen Vorläufern gebildet, sogenannte “sekundäre Aerosolpartikel”. Aufgrund der vielen Quellen, aber vor allem wegen der komplexen Chemie, welche die sekundären Partikelmasse bildet, besteht Feinstaub aus einer enormen Anzahl von Substanzen; es wurden über 10’000 vor allem organische Verbindungen identifiziert. Die genaue chemische Struktur des Grossteils dieser Verbindungen und vor allem deren mögliche Toxizität ist aber noch kaum erforscht. Deshalb ist auch nur in Ansätzen bekannt, welche Partikelquellen und Bildungsprozesse in der Atmosphäre besonders gesundheitsschädlich sind. Es ist aber sehr wahrscheinlich, dass Partikelmasse allein (welche die Grundlage der heutigen Luftreinhalte-Grenzwerte darstellt) keine präzise Angabe der Partikel-Toxizität erlaubt.

Die detaillierte Untersuchung der Zusammensetzung dieser Partikel ist eine grosse analytisch-chemische Herausforderung, da die meisten Analysemethoden nicht geeignet sind, solche hochkomplexen Substanzgemische zu trennen, die einzelnen Bestandteile zu identifizieren und zu quantifizieren. Zudem müssen die Feinstaub-Analysemethoden extrem empfindlich sein, da einzelne Substanzen oft nur im ng-Bereich in verfügbaren Proben vorhanden sind. Analytische Methoden, welche auf Flüssigchromatographie-Massenspektrometrie beruhen, sind hierzu oft am besten geeignet, da sie eine sehr hohe Empfindlichkeit haben und zudem auch einzelne Substanzen in Proben mit hoher Komplexität individuell quantifizieren können.

Da speziell auch während Feldmessungen Analysemethoden und Instrumente fehlen, welche spezifische toxische Partikelkomponenten direkt in der Aussenluft quantifizieren können, müssen neue Analysemethoden und Instrumente entwickelt werden. Die Entwicklung entsprechender Analyseinstrumente und die detaillierte Analyse von toxischen Partikelkomponenten ist einer der Forschungsschwerpunkte der Atmosphärenwissenschaften an der Universität Basel.

1.2 Forschungsschwerpunkt Stadtklimatologie

Das Klima in einem städtischen Umfeld unterscheidet sich vom städtischen Umland aufgrund einer Vielzahl von Faktoren, wie zum Beispiel der dichteren Überbauung (und damit einhergehender geringerer Anteil an Vegetation) oder stärkeren anthropogenen Emissionen von klimawirksamen Spurengasen.

CO_2 ist das für die Klimaerwärmung hauptsächlich verantwortliche anthropogene Treibhausgas, welches weltweit vor allem in urbanen Gegenden emittiert wird. Die Quantifizierung und detaillierte Aufschlüsselung nach einzelnen Quellen der CO_2-Emissionen ist jedoch eine grosse Herausforderung aufgrund der zeitlichen und räumlichen äusserst heterogenen Emissionen in Städten. Im Gegensatz zu natürlichen Ökosystemen dominieren im städtischen Umfeld vor allem die anthropogenen CO_2-Emissionen aus der Verbrennung fossiler Energieträger. Die beiden grössten Emittenten sind dabei die Gebäude (Heizung) und der Verkehr. Die Stadt Basel unternimmt zur Zeit grösste Anstrengungen, um diese Emissionen mit geeigneten Massnahmen zu reduzieren. Unser Forschungsschwerpunkt CO_2-Monitoring aus einer Kombination von Messung

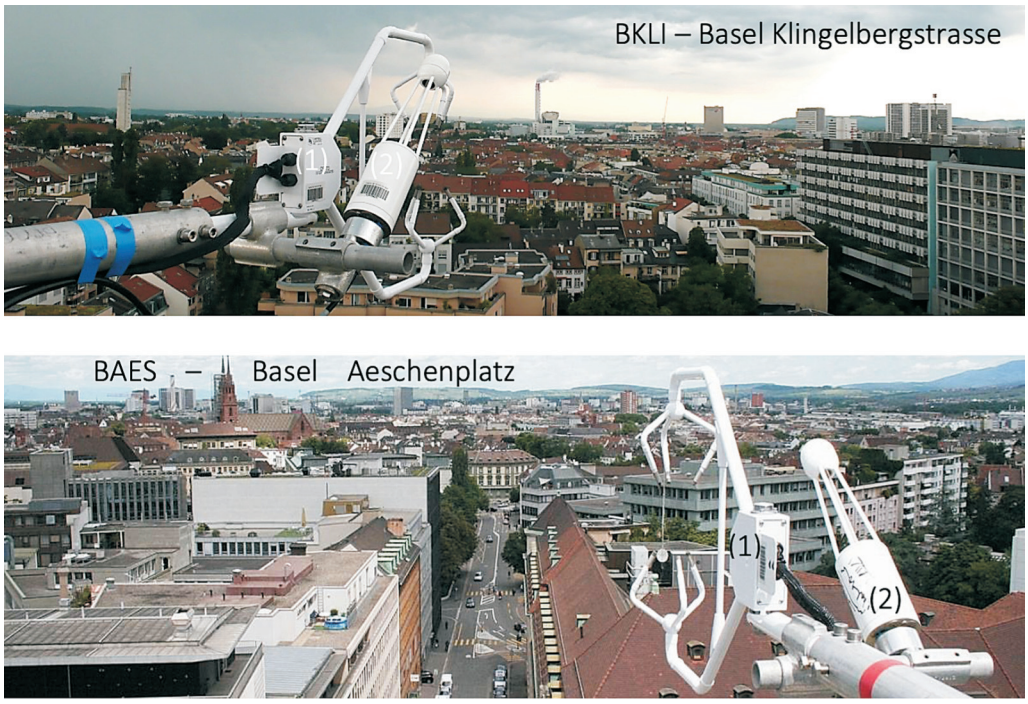

Abb. 1 Eddykovarianz-Perspektive der beiden Messtürme Klingelbergstrasse (Messreihe seit 2004) und Aeschenplatz (Messreihe seit 2009). Die Instrumentierung besteht jeweils aus einem Ultraschallanemometer für die Messung der Windfluktuaktionen (1) und einem Gasanalysator für die Messung der Konzentrationsfluktuationen von Wasserdampf und Kohlendioxid (2). *Foto: R. Vogt, Universität Basel*

und Modellierung liefert dazu ein geeignetes Instrument, um den Erfolg solcher Massnahmen mittel- und langfristig zu evaluieren. Die Messung der CO_2-Emissionen erfolgt mittels der Eddykovarianz-Methode, die zeitlich hoch aufgelöst (Tagesgang) detaillierte Einblicke in die Emissionsdynamik bietet.

Atmosphärenwissenschaftliche Forschung an der Universität Basel hat in der Vergangenheit die Thematik Stadtklimatologie mit mikrometeorologischen Methoden in Kombination mit Fernerkundung zu Fragen der urbanen Energiebilanz und des turbulenten Austauschs wichtige Beiträge geleistet. *Feigenwinter* et al. (2017) geben hier einen umfassenden Überblick. Stand am Anfang die vertikale Struktur der Turbulenz (*Feigenwinter & Vogt* 2005), die städtische Energiebilanz (*Christen & Vogt* 2004), die Charakterisierung und Quantifizierung der städtischen Wärmeinsel und der thermische Wirkungskomplex (*Parlow* et al. 2014, *Wicki* et al. 2018) im Vordergrund, so wurde im Laufe der Jahre zunehmend der Fokus auf die Untersuchung der CO_2-Emissionen der Stadt gelegt (*Vogt* et al. 2005, *Lietzke & Vogt* 2013, *Schmutz* et al. 2016).

Im Laufe der Jahre hat sich ein urbanes Freilandlabor entwickelt (*Spirig* et al. 2021) zu dessen weltweiten Alleinstellungsmerkmal zwei Messtürme gehören, an denen langjährig meteorologische Grössen und mittels der Eddykovarianz-Methode neben den turbulenten Wärmeströmen (sensible und latent) eben auch CO_2-Flüsse gemessen werden. Abbildung 1 zeigt die beiden Messstandorte, an denen dies seit 18 (BKLI), respektive 12 Jahren (BAES) kontinuierlich geschieht.

2 Forschungsresultate

2.1 Forschungsschwerpunkt Chemische Feinstaubanalysen

Es gibt eine Vielzahl an Substanzen im Feinstaub, die potenziell toxisch sind, beispielsweise Schwermetalle, starke Säuren, organische Verbindungen wie (oxidierte) polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe, oder oxidierende Verbindungen wie Peroxide. Es ist aber eine grosse Herausforderung, die relevanten toxischen Substanzen im Feinstaub zu identifizieren und zu quantifizieren, da diese Substanzen nur in extrem geringen Spurenkonzentrationen vorliegen und feinstaubexponierte Personen meist nur über sehr lange Zeiträume Krankheitsbilder entwickeln. Die enorme Variabilität in der Empfindlichkeit von einzelnen exponierten Personen trägt ebenfalls dazu bei, dass es bis heute keine eindeutigen Informationen über die toxischsten Feinstaubkomponenten gibt.

Seit einigen Jahren wird in der Fachliteratur die Hypothese diskutiert, dass oxidierende Komponenten im Feinstaub dessen Toxizität verursachen und einen sogenannten oxidativen Stress in der Lunge und anderen Organen auslösen. Als oxidativer Stress wird eine Situation bezeichnet, bei dem das körpereigene Abwehrsystem, vor allem die Produktion von Antioxidantien in der Lunge, von eingeatmeten, oxidierenden Feinstaubkomponenten überfordert wird und diese nicht mehr unschädlich machen kann. Somit können diese oxidierenden Substanzen im Feinstaub (z.B. Metalle oder Peroxide) Lungenzellen schädigen, was über einen längeren Zeitraum zu Entzündungen und Krankheiten führen könnte. Substanzen, welche oxidierend wirken, werden in diesem Zusammenhang oft unter dem Begriff reactive oxygen species (ROS) zusammengefasst und umfassen vor allem anorganische und organische Peroxide und Radikale. Ein solcher Zusammenhang zwischen ROS-Feinstaubkomponenten und Krankheiten bei exponierten Personen konnte jedoch bis heute nicht mit Messungen nachgewiesen werden, da es keine Methoden und Instrumente gibt, welche kontinuierlich bei Feldmessungen eingesetzt werden können und mit denen alle oxidierenden Verbindungen in ihrer Gesamtheit quantifiziert werden können. Die analy-

tisch-chemische Herausforderung besteht vor allem darin, dass sehr unterschiedliche Substanzen oxidierend wirken können, diese jeweils aber nur in äusserst geringen Konzentrationen vorliegen. Eine zusätzliche Schwierigkeit besteht darin, dass viele oxidierende Substanzen hoch reaktiv und kurzlebig sind, das heisst, sie müssen mit Instrumenten gemessen werden, welche ohne Zeitverlust (d. h. "online") ROS direkt am Ort der Probenahme – im Labor oder Feld – quantifizieren können.

Wir haben in den letzten Jahren eine neue analytisch-chemische Methode und ein Instrument entwickelt, welches diese oxidierenden Aerosoleigenschaften quantifizieren kann (*Wragg* et al. 2016, *Campbell* et al. 2019). Mit dieser neuen Methode untersuchen wir, ob und in welchem Masse ROS-Feinstaubkomponenten von diversen Quellen als neuer und spezifischer Indikator für Feinstaub-Toxizität an verschiedensten Standorten verwendet werden können.

In unserem neuen Instrument OPROSI (Online Particle-bound Reactive Oxygen Species Instrument, Abb. 2) wird feinstaubhaltige Luft kontinuierlich angesaugt und analysiert. Zunächst werden Spurengase vom Feinstaub mittels einem sogenannten Denuder getrennt, da nur die oxidierenden Eigenschaften des Feinstaubs quantifiziert werden sollen. In einem weiteren Schritt werden die Partikel aus dem Luftstrom entfernt und kontinuierlich in eine Flüssigkeit überführt. In der flüssigen Phase reagieren die oxidierenden Substanzen in zwei Schritten mit Reagenzien (Horseradish Peroxidase und 2',7'-Dichlorofluorescein). Diese Reaktionen führen zu einem fluoreszierenden Reaktionsprodukt, welches mit einem Spektrometer quantifiziert wird und über eine Kalibration direkt mit der ROS Konzentration im Feinstaub korreliert ist.

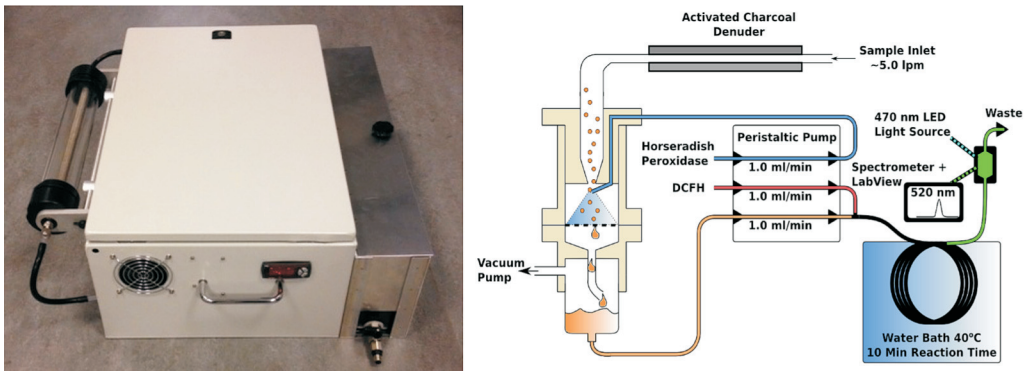

Abb. 2 Foto und schematischer Aufbau des ersten Instruments (OPROSI), mit welchem oxidierende und potentiell toxische Feinstaubkomponenten in Feld- und Laborexperimenten direkt und kontinuierlich quantifiziert werden können (*Wragg* et al. 2016).

Die kompakte und geschlossene Bauweise des Instruments erlaubt den Einsatz bei Labor- und Feldexperimenten. In den letzten Jahren wurde das OPROSI bei mehreren grossen internationalen Labor-Experimenten eingesetzt, bei denen Feinstaub unter realistischen atmosphärischen und reproduzierbaren Bedingungen hergestellt wurde. In diesen Experimenten wurde die Zusammensetzung und Toxizität diverser natürlicher und anthropogener Feinstaubquellen analysiert und auch die biologisch-toxische Wirkung von Feinstaub auf Lungenzellkulturen und Mausmodellen untersucht (*Platt* et al. 2014, *Zhang* et al. 2022, *Offer* et al. 2022).

Wir konnten dabei zeigen, dass die durch Sonnenlicht induzierten komplexen chemischen Reaktionen einen entscheidenden, vielleicht sogar überwiegenden Beitrag leisten zur gesamten ROS Konzentration, welche im Feinstaub gemessen wurde (*Platt* et al. 2014, *Zhang* et al. 2022). Zudem konnten wir zeigen, dass anthropogene Feinstaubquellen deutlich toxischer sind als vergleichbare

Partikel von natürlichen Quellen. Für diese toxikologisch-biologischen Arbeiten werden in einem Instrument, das wir in Zusammenarbeit mit Zellbiologen der Universität Bern und Ingenieuren der Fachhochschule Nordwestschweiz entwickelt haben (*Mertes* et al. 2013), Feinstaubpartikel direkt aus einem kontinuierlichen Luftstrom auf humane Lungenzellen von gesunden und erkrankten Probanden in Zellkulturen deponiert. Damit kann man die natürlichen Partikel-Abscheidevorgänge in der Lunge möglichst realitätsnah abbilden. Biologische Analysen der Lungenzellen, welche diesem Feinstaub ausgesetzt wurden, zeigten, dass Partikel mit einem grösseren Anteil an oxidierenden Substanzen (ROS) auch vermehrt oxidativen Stress in Lungenzellen verursachen und Entzündungsreaktionen auslösen (*Künzi* et al. 2015; *Zhang* et al. 2022; *Offer* et al. 2022).

Das OPROSI wurde auch in mehreren Feldkampagnen eingesetzt, bei denen die ROS-Konzentration in verschiedenen, stark verschmutzten Städten gemessen wurde. Die Messungen erfolgten in London, UK, Beijing, China und Padua in der italienischen Poebene, die zu den am stärksten verschmutzten Regionen Europas gehört (Abb. 3).

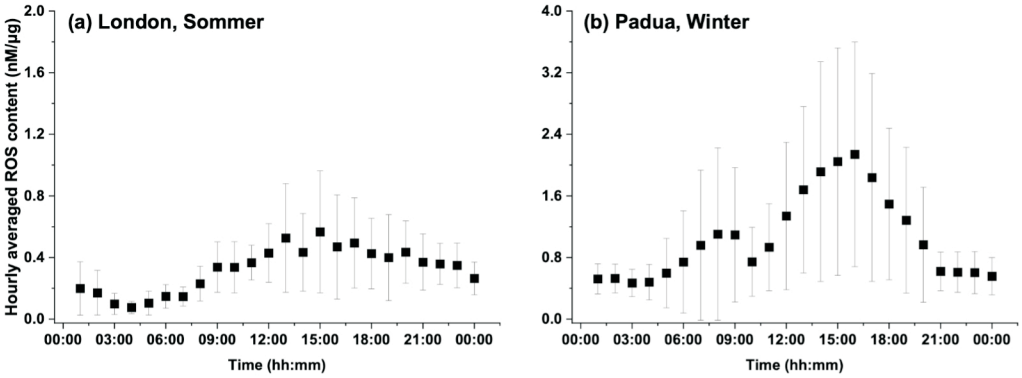

Abb. 3 Durchschnittliche Tagesgänge oxidierender, toxischer Feinstaubkomponenten (ROS) in London und Padua während jeweils 2–3-wöchiger Dauer. Die ROS-Konzentrationen pro µg Feinstaub zeigen einen deutlichen Tagesgang mit Maxima am Nachmittag, was auf photo-chemisch induzierte Bildungsprozesse für ROS hindeutet. *Quelle: Messkampagnen Zhang et al., 2022, in prep.*

Bei all diesen Feldmessungen, sowohl in Europa oder in Beijing als auch im Sommer oder Winter, zeigt sich oft ein klarer Tagesgang der ROS Konzentrationen mit den höchsten Konzentrationen jeweils nachmittags (Abb. 3a, b). Die Fehlerbalken in Abbildung 3 geben die Variabilität der Tagesgänge an (von Tagen, an denen kaum ein Tagesgang beobachtet wird bis zu Tagen, an denen die ROS-Konzentration am Nachmittag mehr als einen Faktor 10 höher ist als in der Nacht). Die Tagesgänge sind im Sommer wesentlich weniger ausgeprägt als im Winter aufgrund der stabileren und weniger mächtigen planetaren Grenzschicht im Winter, in welcher sich die Emissionen aufkonzentrieren.

Diese Beobachtungen deuten darauf hin, dass photochemische Prozesse, welche nachmittags besonders intensiv sind, eine wichtige Rolle zur Erklärung der Toxizität von Feinstaub spielen könnten.

In weiteren laufenden Projekten untersuchen wir die detaillierte molekulare Struktur von oxidierendend organischen Substanzen, die möglicherwiese zur Toxizität beitragen. Dazu entwickeln wir vor allem Methoden zur quantitativen Analyse von Peroxiden, welche in der atmosphärischen Oxidation von organischen Substanzen entstehen, für welche aber kaum etablierte Analysemethoden bestehen, vor allem nicht im Spuren-Konzentrationsbereich, der für die Analyse von Feinstaubkomponenten nötig ist (*Steimer* et al. 2017). Dabei kommen vor allem hochauflösende

massenspektrometrische Techniken, gekoppelt mit Flüssigchromatographie, zum Einsatz. Mit diesen Arbeiten gewinnen wir ein vertieftes mechanistisch-chemisches Verständnis, um die gesamte Menge an ROS, welche wir mit unserem OPROSI-Gerät messen, verschiedenen Feinstaubquellen und atmosphärischen Prozessen zuordnen zu können.

2.2 Forschungsschwerpunkt CO_2-Emission

Wie in der Einleitung erwähnt, stellen die beinahe 20-jährigen Messreihen der CO_2-Flüsse in Basel einen einmaligen Datensatz dar, mit dem nicht nur die langjährigen Emissions-Trends des wichtigsten Treibhausgases untersucht werden können, sondern auch das Verständnis über die Dynamik und Quellen der CO_2-Flüsse mit Modellen für die ganze Stadt verfeinert werden kann (*Stagakis* et al., 2021).

Lietzke & Vogt (2013) haben für die CO_2-Konzentration gezeigt, welch enorme räumliche und zeitliche Differenzierungen sich im Zusammenwirken der Quellen, der meteorologischen Verhältnisse und der städtischen Oberfläche einstellen. Von der Absolutgenauigkeit her handelt es sich bei diesen CO_2-Konzentrationsmessungen zwar nicht um Referenzmessungen, trotzdem lassen sie sich sehr gut mit den regionalen Referenz-Messstandorten Schauinsland und Jungfraujoch in Bezug setzen (*Schmutz* et al. 2016) und passen auch zu den globalen bzw. hemisphärischen Referenzenmessungen (Abb. 4). Nicht unerwartet folgen sie dem Trend, machen dies aber mit einer für urbane Hotspots der CO_2-Emisson typisch stark erhöhten Jahresamplitude. Diese Messungen zeigen jährliche Maxima der Monatsmittel im Winter mit 30–50ppm höheren CO_2-Konzentrationen im Vergleich zu den Sommerwerten, was vor allem auf den erhöhten Verbrauch fossiler Brennstoffe im Winter zu Heizzwecken zurückzuführen ist.

Unsere laufenden Forschungsaktivitäten konzentrieren sich auf die Entwicklung neuartiger beobachtungsbasierter Methoden zur Quantifizierung städtischer CO_2-Emissionen mit hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung (20 bis 100 m, stündlich) und die Zuordnung dieser Emissionen zu spezifischen Quellen und Senken (fossil: Wohngebäude, Gewerbe/Industrie, Verkehr; biologisch: Atmung, Photosynthese). Der entwickelte Ansatz ist unterteilt in zwei Schritte: Im ersten Schritt werden die wichtigsten städtischen CO_2-Fluss-Komponenten (Gebäudeemissionen, Verkehrsemissionen, menschlicher Stoffwechsel, photosynthetische Aufnahme, Pflanzenatmung, Bodenatmung) unabhängig voneinander, basierend auf räumlich und zeitlich hochaufgelösten

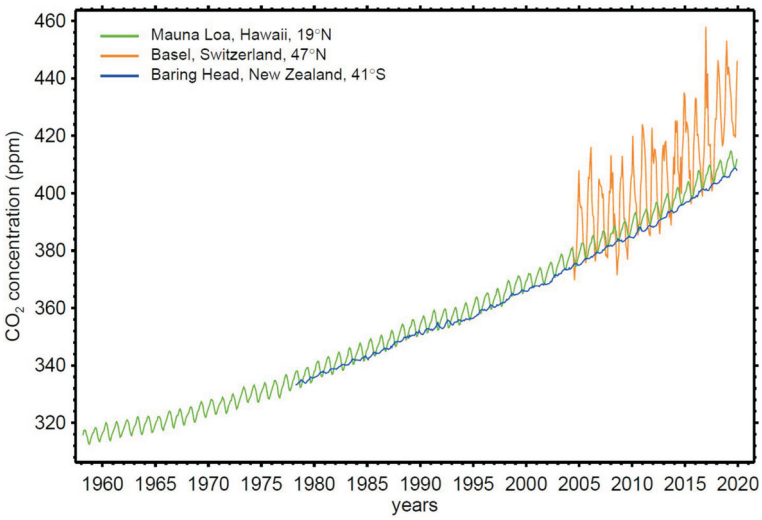

Abb. 4 Langjährige Monatsmittel der CO_2-Konzentration für die Messstation an der Klingelbergstrasse in Basel (Quelle: R. Vogt, M. Schmutz, unveröffentlichte Daten und Referenzmessungen in Hawaii [Datenquelle:gml.noaa.gov/ccgg/trends/] und Neuseeland [Datenquelle:niwa.co.nz/static/tropac/co2/bhd/].

Datensätzen über Bevölkerung, Verkehr und Meteorologie, modelliert. Im zweiten Schritt werden die modellierten CO_2-Fluss-Komponenten mit den beobachteten Gesamtflüssen aus Messturm-gestützten Eddy-Kovarianz-Systemen unter Verwendung einer probabilistischen Inversionsmethode (Bayes'sche Inferenz) kombiniert, um optimierte Schätzungen für jede Komponente und ihre Unsicherheiten abzuleiten. Die Kombination zwischen den gerasterten Flüssen und den Eddy-Kovarianz-Messungen wird durch die Modellierung des turbulenten Fluss-Fussabdrucks erreicht, der entsprechend der räumlichen Verteilung der städtischen Morphologie um jeden Turm anisotrop parametrisiert wird. Die Methode wird auf das Stadtzentrum von Basel, Schweiz, angewandt und deckt eine Fläche von 9 km^2 ab. Abbildung 5 zeigt einige erste Ergebnisse dieses Ansatzes, der die CO_2-Flussdynamik im Stadtzentrum von Basel über drei Jahre (2018–2020) visualisiert, basierend auf CO_2-Flussmessungen an den beiden Messtürmen. Kurzfristige und saisonale Schwankungen der verschiedenen CO_2-Flusskomponenten sind deutlich erkennbar. Emissionen von Gebäuden (v.a. zu Heizzwecken) sind eindeutig die dominante CO_2-Emissionsquelle im Stadtzentrum von Basel mit einem Anteil von ca. 50 % an den gesamten Emissionen. Die Vegetation ist der einzige Faktor, der über das Sommerhalbjahr signifikante Mengen an CO_2 aus der Atmosphäre durch Photosynthese aufnimmt, also eine CO_2-Senke darstellt. Im Jahresdurchschnitt werden dadurch im untersuchten Bereich der Stadt Basel mit den wenigen Parkflächen immerhin über 5 % des emittierten CO_2 wieder absorbiert.

Diese Methode für die CO_2-Fluss-Modellierung wird im Rahmen eines grossen europäischen Forschungsprograms weiterentwickelt (Pilot Application in Urban Landscapes towards integrated city observatories for greenhouse gases, ICOS-Cities, 🌍$_2$) und auf andere Städte in Europa ausgedehnt mit dem Ziel, ein zukünftiges Netz städtischer Treibhausgasobservatorien aufzubauen. Dieses Projekt wird vom European Integrated Carbon Observation System (ICOS) koordiniert (🌍$_3$). Die ICOS-Forschungsinfrastruktur liefert bereits wertvolle Erkenntnisse über Treibhausgase auf kontinentaler und nationaler Ebene und zielt nun darauf ab, Forschungsinfrastruktur für Treibhausgase auf städtische Gebiete auszuweiten. Basel ist Partnerstadt des

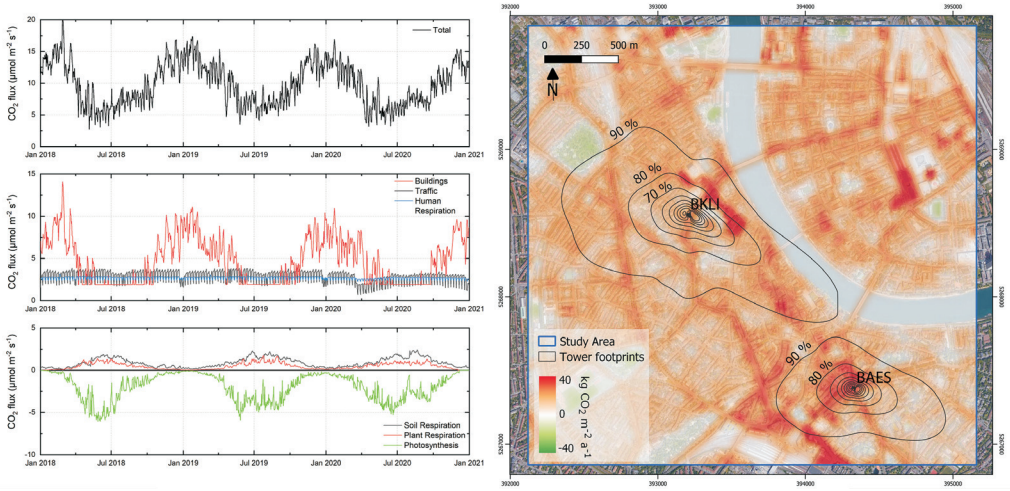

Abb. 5 Links: Modellierte Tagesmittel der gesamten CO_2-Emissionen für das Stadtzentrum von Basel für 2018 bis 2020 (oben) und die verschiedenen Komponenten: Gebäude, Verkehr, menschliche Atmung (Mitte), Boden- und Pflanzenatmung, Photosynthese (unten). Rechts: Räumliche Verteilung der modellierten jährlichen Gesamtemissionen von CO_2 (kg CO_2 m^{-2} a^{-1}) mit einer Auflösung von 25 m. Die schwarzen Konturlinien markieren die mittleren Quellflächen für die beiden Messtürme mit CO_2-Flussmessungen. Eine Videoanimation ist unter 🌍$_1$ zu finden. *Quelle: Stagakis et al. 2021*

ICOS-Cities. Darüber hinaus ist einer unserer Messtürme, der sich auf dem Universitätsgebäude an der Klingelbergstrasse befindet, die erste städtische Station in der Schweiz, die sich 2022 dem ICOS-CH Messnetz anschließt (🌍4) und damit Basel zu einer der ersten Städte in Europa mit operativer Treibhausgasbeobachtungen macht.

3 Fazit

Die gegenwärtigen internationalen Anstrengungen zu einer detaillierteren Beurteilung der Toxizität von Feinstaub zielen schlussendlich darauf ab, der Gesellschaft und Politik bessere Werkzeuge und Entscheidungsgrundlagen zur Minimierung der Bevölkerungsexposition mit toxischen Feinstaubbestandteilen zur Verfügung stellen zu können. Zwar wird in den momentan geltenden Luftreinhalteverordnungen vieler Länder immer noch vorwiegend die totale Massenkonzentration des Feinstaubs geregelt, die Wissenschaft ist sich jedoch aufgrund des Forschungsfortschrittes in den letzten Jahren einig, dass nebst der Masse auch die Anzahl der Partikel und vor allem auch die chemische Zusammensetzung für die Beurteilung der Toxizität relevant ist. Mit der Entwicklung von neuen Methoden und Messinstrumenten zur Messung der Toxizität von Feinstaub leistet die Forschungsgruppe Atmosphärenwissenschaften einen wichtigen Beitrag zu diesen internationalen Anstrengungen.

Der Forschungsschwerpunkt Stadtklimatologie bleibt mit der Einbindung in ICOS-CH und der Partizipation an ICOS-Cities auch in nächster Zukunft an der Front der Forschungsaktivitäten bezüglich Methoden (Messung und Modellierung) zur Quantifizierung von städtischen CO_2-Emissionen. Die fortlaufend verbesserten Modelle und die langjährigen Messreihen bieten den Entscheidungsträgern ein unabhängiges Instrument zur Evaluierung von politischen Massnahmen zur Reduktion von Treibhausgasen. Insbesondere davon profitieren kann die Stadt Basel, welche mit den schweizweit schärfsten Massnahmen eine Vorreiterrolle einnimmt.

Literatur

Campbell S., Utinger B., Lienhard D., Paulson S.E., Shen J., Griffiths P.T., Stell A.C. & Kalberer M. 2019. Development of a Physiologically Relevant Online Chemical Assay to Quantify Aerosol Oxidative Potential. *Analytical Chemistry* 91: 13088–13095.

Christen A. & Vogt R. 2004. Energy and radiation balance of a central European city. *International Journal of Climatology* 24: 1395–1421.

Dockery D.W., Pope C.A., Xu X.P., Spengler J.D., Ware J.H., Fay M.E., Ferris B.G. & Speizer F.E. 1993. An association between air-pullution and mortality in 6 United-States cities. *New England Journal of Medicine* 329: 1753–1759.

Feigenwinter C., Schmutz M., Vogt R. & Parlow, E. 2017. Insights from more than ten years of CO_2 flux measurements in the city of Basel, Switzerland. *Urban Climate News* 65: 24–32.

Feigenwinter C. & Vogt R. 2005. Detection and analysis of coherent structures in urban turbulence. *Theoretical and Applied Climatology* 81: 219–230.

Künzi L., Krapf M., Daher N., Dommen J., Jeannet N., Schneider S., Platt S., Slowik J.G., Baumlin N., Salathe M., Prévôt A., Kalberer M., Strähl C., Dümbgen L., Sioutas C., Baltensperger U. & Geiser M. 2015. Toxicity of aged gasoline exhaust particles to normal and diseased airway epithelia, *Scientific Reports* 5. doi:10.1038/srep11801.

Lietzke B. & Vogt R. 2013. Variability of CO_2 concentrations and fluxes in and above an urban street canyon. *Atmospheric Environment* 74: 60–72. http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.03.030.

Mertes P., Praplan A.P., Künzi L., Dommen J., Baltensperger U., Geiser M., Weingartner E., Ricka J., Fierz M. & Kalberer M. 2013. A novel deposition chamber for nanoparticle – lung interaction studies, *Journal Aerosol Medicine and Pulmonary Drug Delivery*. doi:10.1089/jamp.2012.0985.

Offer S., Di Bucchianico S, Hartner E., Bisig C., Bauer S., Pantzke J., Zimmermann E. J., Cao X., Binder S., Huber A., Jeong S., Martens P., Mesceriakovas A., Bendl J., Brejcha R., Buchholz A., Gat D., Hohaus T., Rastak N., Jakobi G., Kalberer M., Kanashova T., Ogris C., Marsico A., Theis F., Hu E., Levin M., Gröger T., Öder S., Orasche J., Paul A., Ziehm T., Zhang J., Adam T., Sippula O., Sklorz M., Schnelle-Kreis J., Czech H., Kiendler-Scharr A., Rudich Y & Zimmermann R. 2022. Differential toxicological impact of biogenic and anthropogenic secondary organic aerosol compounds condenses on soot particles in lung cell models at the air-liquid interface, *Environmental Health Perspectives*. doi:10.1289/EHP9413.

Parlow E., Vogt R. & Feigenwinter C. 2014. The urban heat island of Basel – seen from different perspectives. *Die Erde* 145: 96–110.

Platt S.M., El Haddad I., Pieber S.M., Huang R.J., Zardini A.A., Clairotte M., Suarez-Bertoa R., Barmet P., Pfaffenberger L., Wolf R., Slowik J.G., Fuller S.J., Kalberer M., Chirico R., Dommen J., Astorga C., Zimmermann R., Marchand N., Hellebust S., Temime-Roussel B., Baltensperger U. & Prevot A. 2014. Two-stroke scooters are a dominant source of air pollution in many cities. *Nature Communications. doi:10.1038/ncomms4749.*

Schmutz M., Vogt R., Feigenwinter C. & Parlow E. 2016. Ten years of eddy covariance measurements in Basel, Switzerland: Seasonal and interannual variabilities of urban CO_2 mole fraction and flux. *Journal of Geophysical Research Atmospheres* 121: 8649–8667. doi: 10.1002 /2016JD025063

Spirig R., Feigenwinter C., Kalberer M., Parlow E. & Vogt R. 2021. Dolueg A Measurement Network's Face. *Bulletin of the American Meteorological Society* 102: 629–631. https://doi.org/10.1175/BAMS-D-20-0196.1.

Stagakis S., Feigenwinter C., Zurbriggen E., Pitacco A. & Vogt R. 2021. Spatiotemporal dynamics of CO_2 flux in Basel city centre. *EGU General Assembly* 2021, online, 19–30 Apr 2021, EGU21-9906. https://doi.org/10.5194/egusphere-egu21-9906.

Steimer S.S., Kourtchev I. & Kalberer M. 2017. Mass Spectrometry Characterization of Peroxycarboxylic Acids as Proxies for Reactive Oxygen Species and Highly Oxygenated Molecules in Atmospheric Aerosols, *Analytical Chemistry* 89: 2873–2879.

Vogt R., Christen A., Rotach M.W., Roth M. & Satyanarayana A.N.V. 2005. Temporal dynamics of CO2 fluxes and profiles over a Central European city. *Theoretical and Applied Climatology*. 84: 117–126.

WHO, World Health Organisation 2016. Ambient air pollution: A global assessment of exposure and burden of disease, ISBN: 9789241511353. Online erhältlich: http://www.who.int/phe/publications /air-pollution-global-assessment/en/

Wicki A., Parlow E. & Feigenwinter C. 2018. Evaluation and Modeling of Urban Heat Island Intensity in Basel, Switzerland, *Climate* 6: 55. doi: 10.3390 /cli6030055.

Wragg F.P.H., Fuller S.J., Freshwater R., Green D.C., Kelly F.J. & Kalberer M. 2016. An Automated On-line Instrument to Quantify Aerosol-Bound Reactive Oxygen Species (ROS) for Ambient Measurement and Health Relevant Aerosol Studies, *Atmospheric Measurement Techniques* 9: 4891–4900.

Zhang Z.-H., Hartner E., Utinger B., Gfeller B., Paul A., Sklorz M., Czech H., Yang B.X., Su X.Y., Jakobi G., Orasche J., Schnelle-Kreis J., Jeong S., Gröger T., Pardo M., Hohaus T., Adam T., Kiendler-Scharr A., Rudich Y., Zimmermann R. & Kalberer M. 2022. *Are reactive oxygen species (ROS) a suitable metric to predict toxicity of carbonaceous aerosol particles?* Atmospheric Chemistry and Physics 22, 1793-1809, https://doi.org/ 10.51947/acp-22-1793-2022.

Internetquellen

[1] https://youtu.be/bKuBx6XS8x4 [Eingesehen am 13.1.2022]

[2] https://www.icos-cp.eu/projects/icos-cities-project [Eingesehen am 13.1.2022]

[3] https://www.icos-cp.eu/ [Eingesehen am 13.1.2022]

[4] https://www.icos-switzerland.ch/ [Eingesehen am 13.1.2022]