

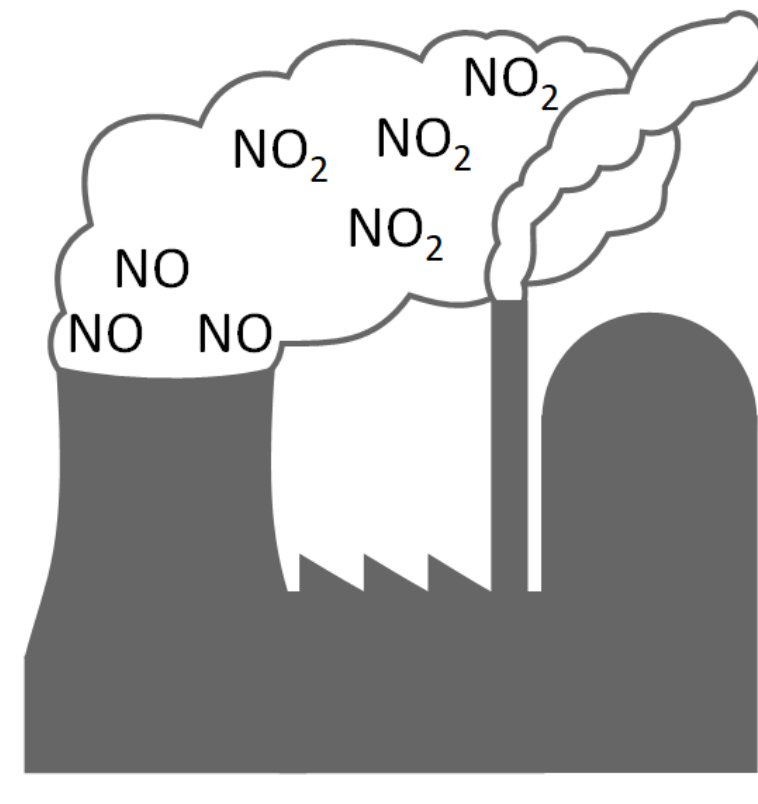
Emissionen und Lebenszeiten von Stickoxiden aus Sentinel-5P-Daten

Kezia Lange (klange@iup.physik.uni-bremen.de), Andreas Richter, John P. Burrows
 Institut für Umweltphysik (IUP), Universität Bremen



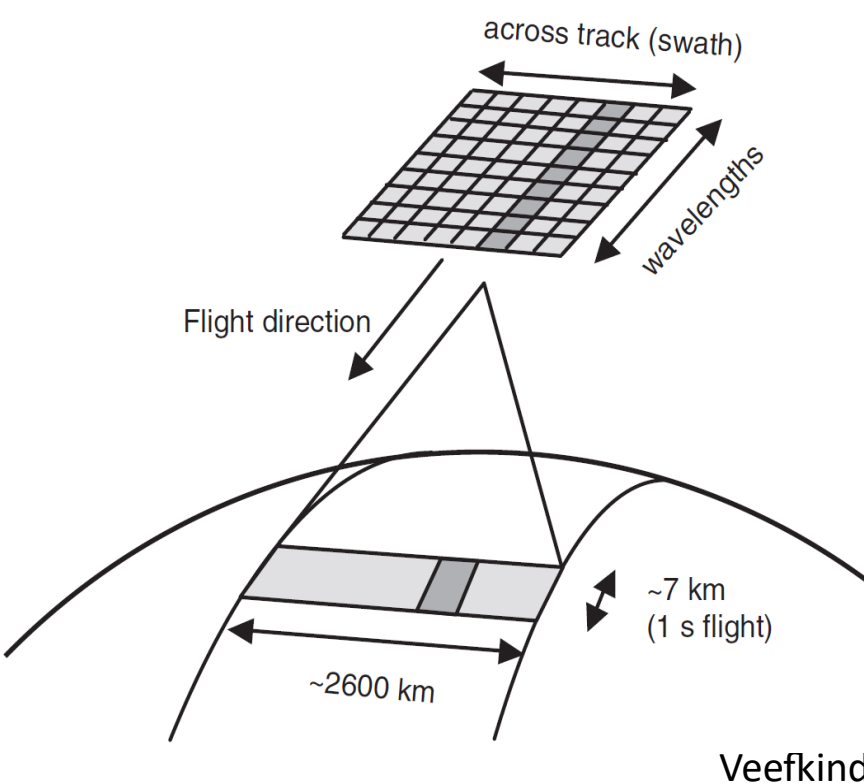
Stickoxidemissionen

- Stickoxide ($\text{NO}_x = \text{NO} + \text{NO}_2$) sind wichtige Spurengase in der Atmosphäre
- Einfluss auf die menschliche Gesundheit, Ozonbildung und das Klima
- Emission durch die Verbrennung fossiler Brennstoffe
- Lebensdauer von NO_x beträgt in der Troposphäre einige Stunden
- NO_x -Emissionen größtenteils in Form von NO
 → schnelle Umwandlung in NO_2
- NO_2 nah an Quellen wird als Nachweis für Luftverschmutzung genutzt



Instrument TROPOMI auf Sentinel-5P

- TROPospheric Monitoring Instrument (TROPOMI) auf dem Satelliten Sentinel-5 Precursor
- Gestartet im Oktober 2017 in eine sonnensynchrone Umlaufbahn in einer Höhe von 824 km
- Tägliche globale Abdeckung mit einer Äquatorüberquerung um 13:30 LT



- TROPOMI misst innerhalb einer Sekunde eine Fläche von 2600 km x 7 km mit einer hohen räumlichen Auflösung von 3,5 x 7 km² im Nadir
- Messung im ultravioletten (270 - 320 nm), sichtbaren (310 - 500 nm) und infraroten Bereich (675 - 775 nm und 2305 - 2385 nm)
- Informationen über die atmosphärische Zusammensetzung von unter anderem Ozon, Schwefeldioxid, Formaldehyd und Stickstoffdioxid

Veeffkind et al. 2012

DOAS-Methode

- DOAS: differentielle optische Absorptionsspektroskopie
- Bestimmung der Konzentrationen verschiedener atmosphärischer Spurengase durch Fernerkundungsmessungen von Licht im ultravioletten, sichtbaren und infraroten Spektralbereich.
- DOAS beruht auf dem Prinzip der Absorptionsspektroskopie.
- Licht, das sich durch die Atmosphäre bewegt, wird dabei teilweise durch Spurengase absorbiert - Lambert Beer'sches Gesetz
- Separation von hoch und niederfrequenten Anteilen → Identifikation des Gases durch „spektralen Fingerabdruck“ im hochfrequenten Anteil
- TROPOMI misst Spektren von gestreutem Sonnenlicht aus der Atmosphäre.

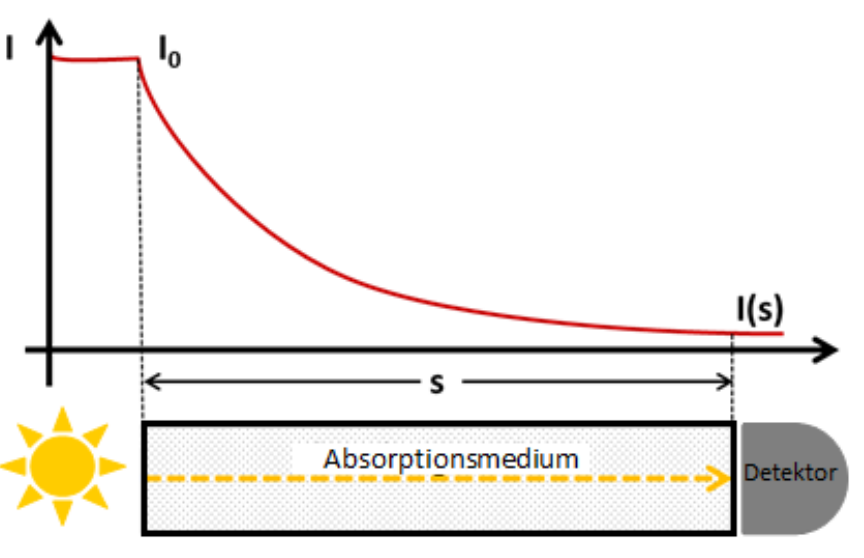
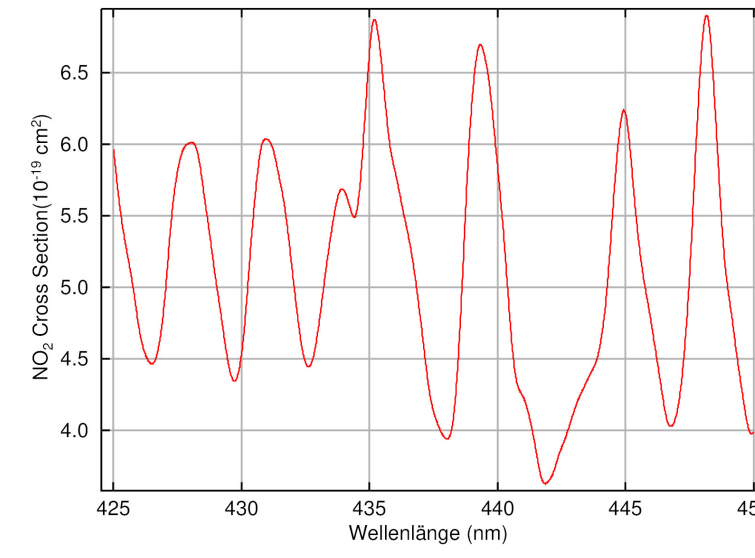
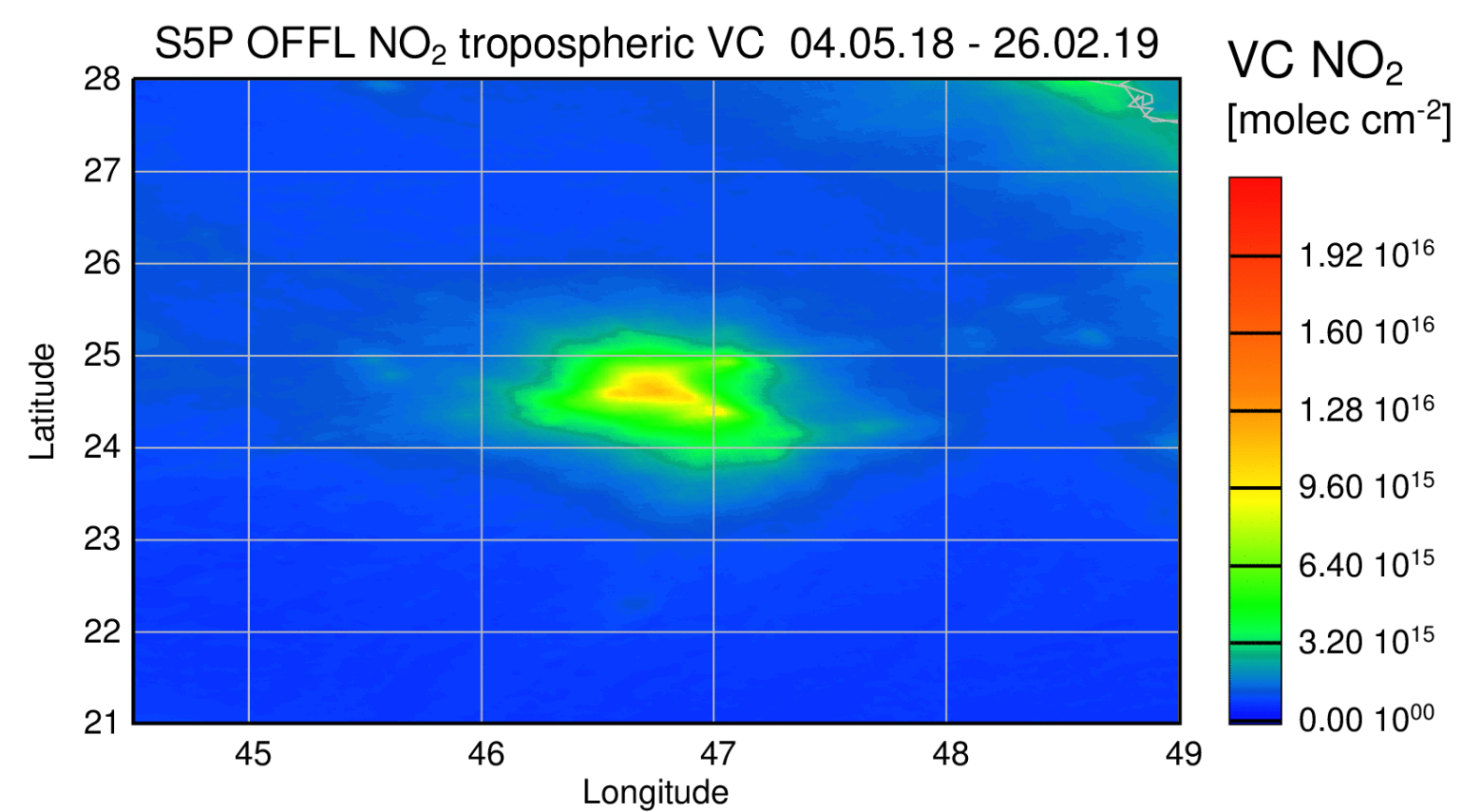
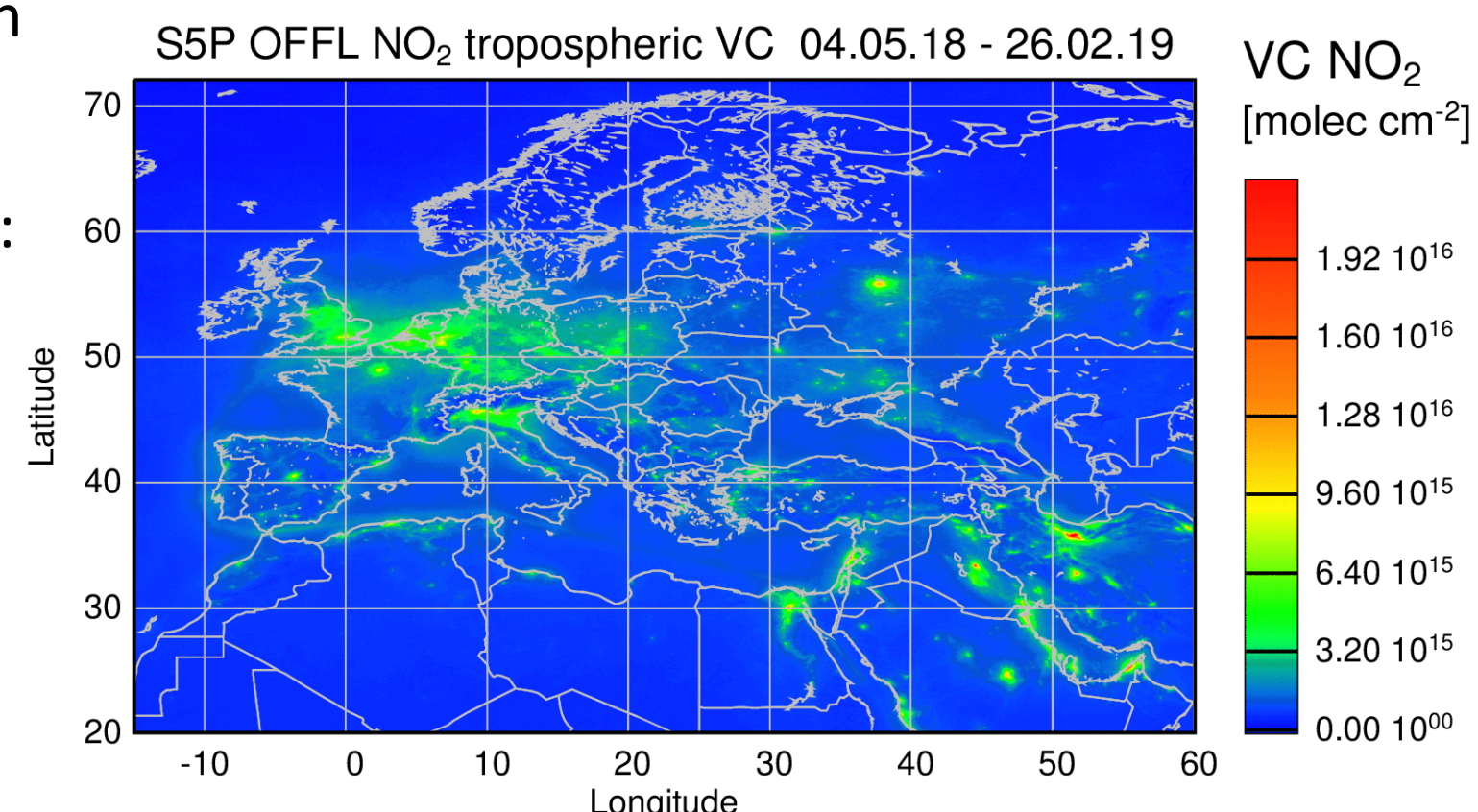


Abb. links: Die Intensität am Ende des Lichtweges hängt von der ursprünglichen Intensität I_0 , der Länge des Lichtweges s , der Gesamtmenge des Absorbers im Lichtweg und der Absorptionsstärke des Absorbers bei der entsprechenden Wellenlänge (Absorptionsquerschnitt) ab.
 Abb. rechts: Hochfrequenter Anteil des Absorptionsquerschnitts für NO_2 .



Verwendete Daten

- Ein Jahr operationelle NO_2 -Daten (Level 2) vom 01. März 2018 bis 28. Februar 2019
- NO_2 -Daten sind von Juli 2018 an frei verfügbar über den ESA Copernicus Open Access Hub
- Pixel mit einem Wolkenanteil von mehr als 50% werden gefiltert und nicht verwendet
- ECMWF Winddaten (0,75°) am Boden → Jedes TROPOMI Pixel wird mit Winddaten verknüpft
- Untersucht wurde die Region um Riad, Hauptstadt Saudi-Arabiens mit einer Einwohnerzahl von ~8 Millionen.
- Riad ist aus verschiedenen Gründen gut geeignet:
 - Große troposphärische Säule NO_2
 - Isoliert → guter Kontrast zwischen Stadt und Umland
 - Nur selten bewölkt
 - Windfelder recht homogen



Ergebnisse

Windsektoren

- Jede TROPOMI Messung wird nach der Methode von Beierle et al. (2011) entsprechend der Windrichtung für das Pixel mit den ECMWF-Daten in einen von acht Windsektoren (Südost, Süd, Südwest, West usw.) eingeteilt.
- Die troposphärischen Säulen NO_2 werden in den entsprechenden Windsektoren gemittelt, sodass die Neutralisierung von Ausströmmustern vermieden wird.
- In den sich ergebenden Verteilungen lassen sich klare Ausströmmuster entsprechend der Windrichtung erkennen.

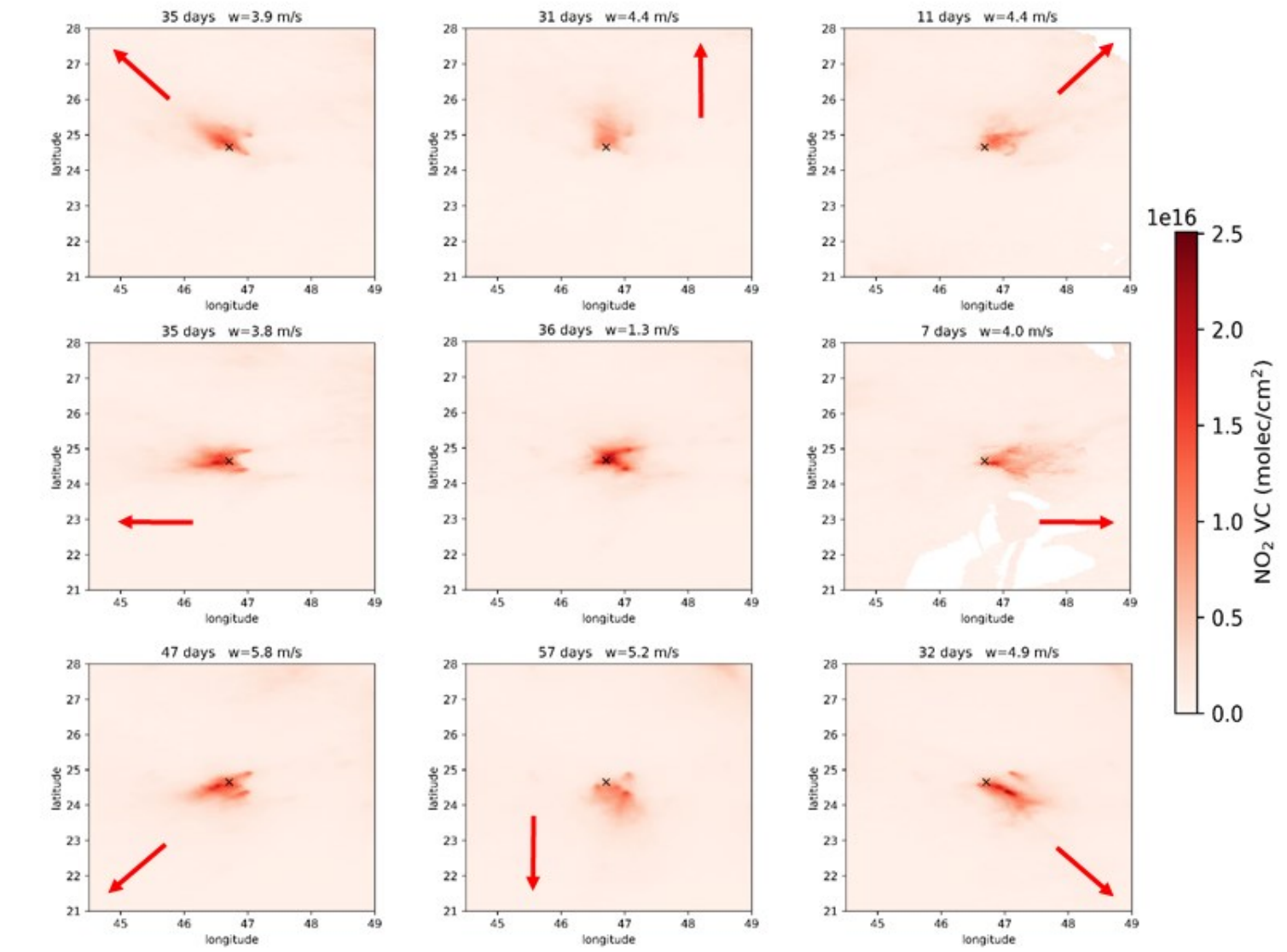


Abb.: Mittlere troposphärische Säule NO_2 um Riad (Kreuz). In der Mitte für geringe Windgeschwindigkeiten ($w < 2$ m/s) und umgeben mit acht Hauptwindrichtungen mit $w \geq 2$ m/s. Die Pfeile entsprechen der jeweiligen Windrichtung des Sektors.

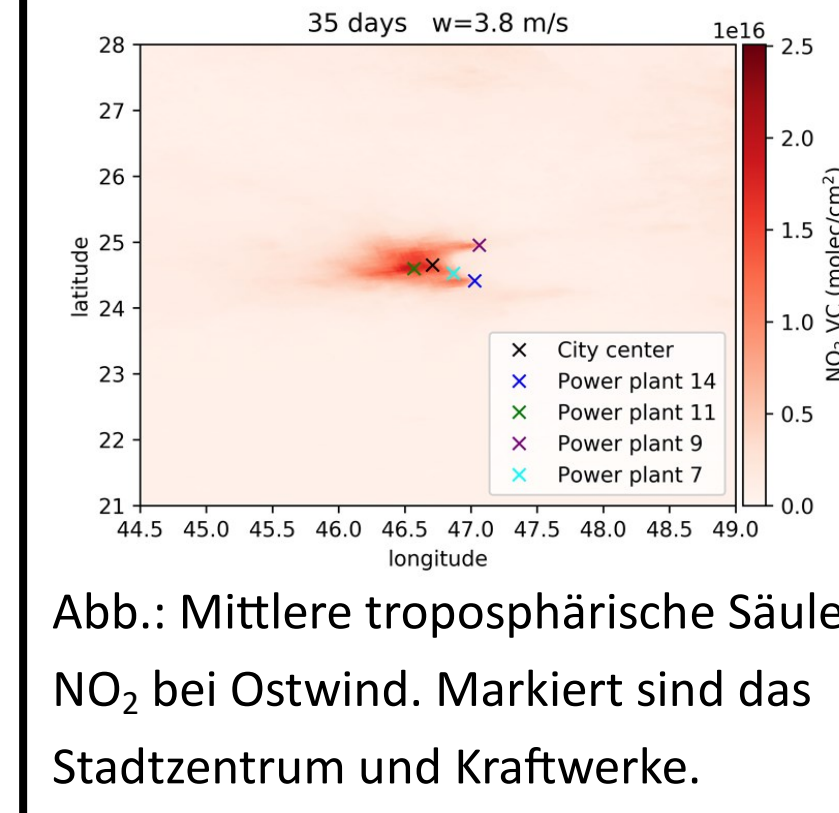


Abb.: Mittlere troposphärische Säule NO_2 bei Ostwind. Markiert sind das Stadtzentrum und Kraftwerke.

- In dieser Studie werden aufgrund der guten räumlichen Auflösung von TROPOMI im Vergleich zu bisherigen Studien wie von Beierle et al., in der OMI-Daten vom 2005-09 verwendet wurden, trotz des kurzen Zeitraums deutlich mehr Details in den Karten erkennbar.
- Zusätzlich zu den insgesamt erhöhten Werten über der Stadt sind auch einzelne starke Quellen in der Stadt und im Umland zu erkennen.

Berechnung von Liniendichten

- 2D-Karten werden auf 1D-Liniendichten reduziert
- Integration der Querschnitte quer zur Windrichtung
- Maximum in Windrichtung verlagert
- In Windrichtung weniger steil als Windaufwärts
- Fit der beobachteten Liniendichten als Funktion der Distanz x mit einer Exponentialfunktion, die den Transport und chemischen Zerfall beschreibt:

$$e(x) = \exp\left(-\frac{x-X}{x_0}\right)$$
 für $x > X$ (Windabwärts), sonst Null
 mit X : Ort der scheinbaren Quelle und x_0 : Distanz nach der die Konzentration dem 1/e-fachen entspricht. Eine Gaußfunktion für die Verbreiterung der Quelle durch Effekte des räumlichen Glättens:

$$G(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(x-X)^2}{2\sigma^2}\right)$$
 mit der Standardabweichung σ
 Skalierung mit einem Emissionsfaktor E' und einer konstanten Hintergrundkonzentration B :

$$M(x) = E' \cdot (e \otimes G)(x) + B$$
- Damit berechnen sich Lebensdauern $\tau = \frac{x_0}{w}$ von ~2.5 h und ein NO_2 -Fluss $E = E' \cdot w$ von ~130 mol/s.

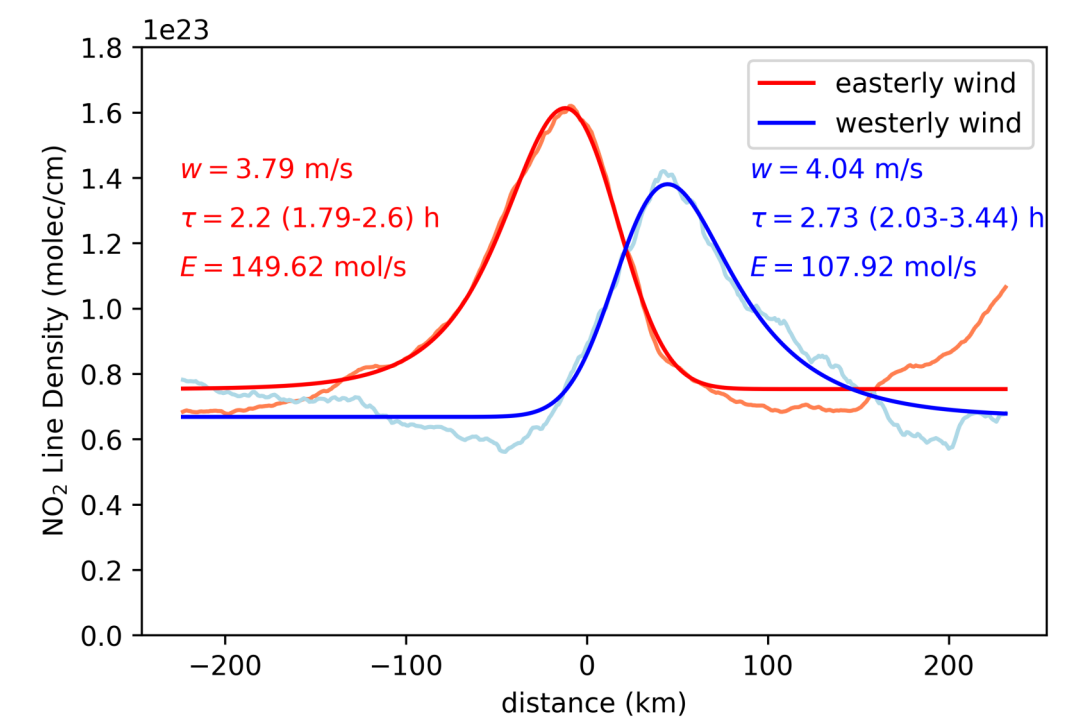


Abb.: Liniendichten als Funktion der Distanz zum Stadtzentrum ($x = 0$ km) für Ostwind (rot) und Westwind (blau).

Separation einzelner Quellen

- Aufgrund der guten räumlichen Auflösung der TROPOMI-Daten ist es möglich einzelne Quellen innerhalb einer Stadt zu separieren. Dies soll genutzt werden um Liniendichten und damit Lebensdauern und Emissionen für die einzelnen Abgasanlagen zu bestimmen.
- Nach Anwendung eines Windrichtungsfilters, um Vermischung verschiedener Fahnen zu vermeiden, werden die Daten der fünf Quellen jeweils auf eine passende einheitliche Windrichtung rotiert.
- In einem Bereich von +/- 10 km um die Quelle werden die Liniendichten bestimmt und daraus Lebensdauern und Emissionen berechnet.

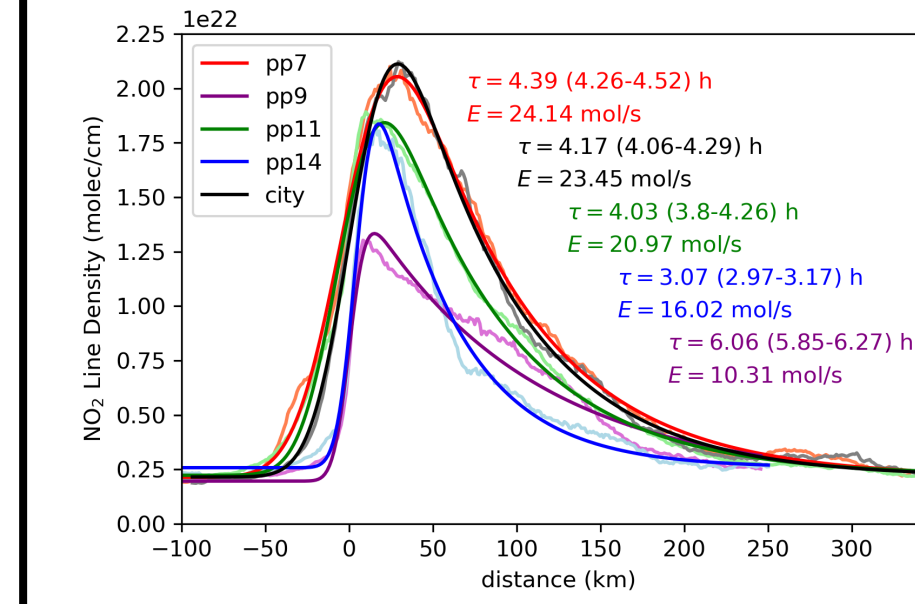


Abb.: Für die 20 km Bereiche bestimmte Liniendichten als Funktion der Distanz zum Zentrum der Quelle für die vier Kraftwerke und die Stadt mit berechneten Lebensdauern und NO_2 -Flüssen.

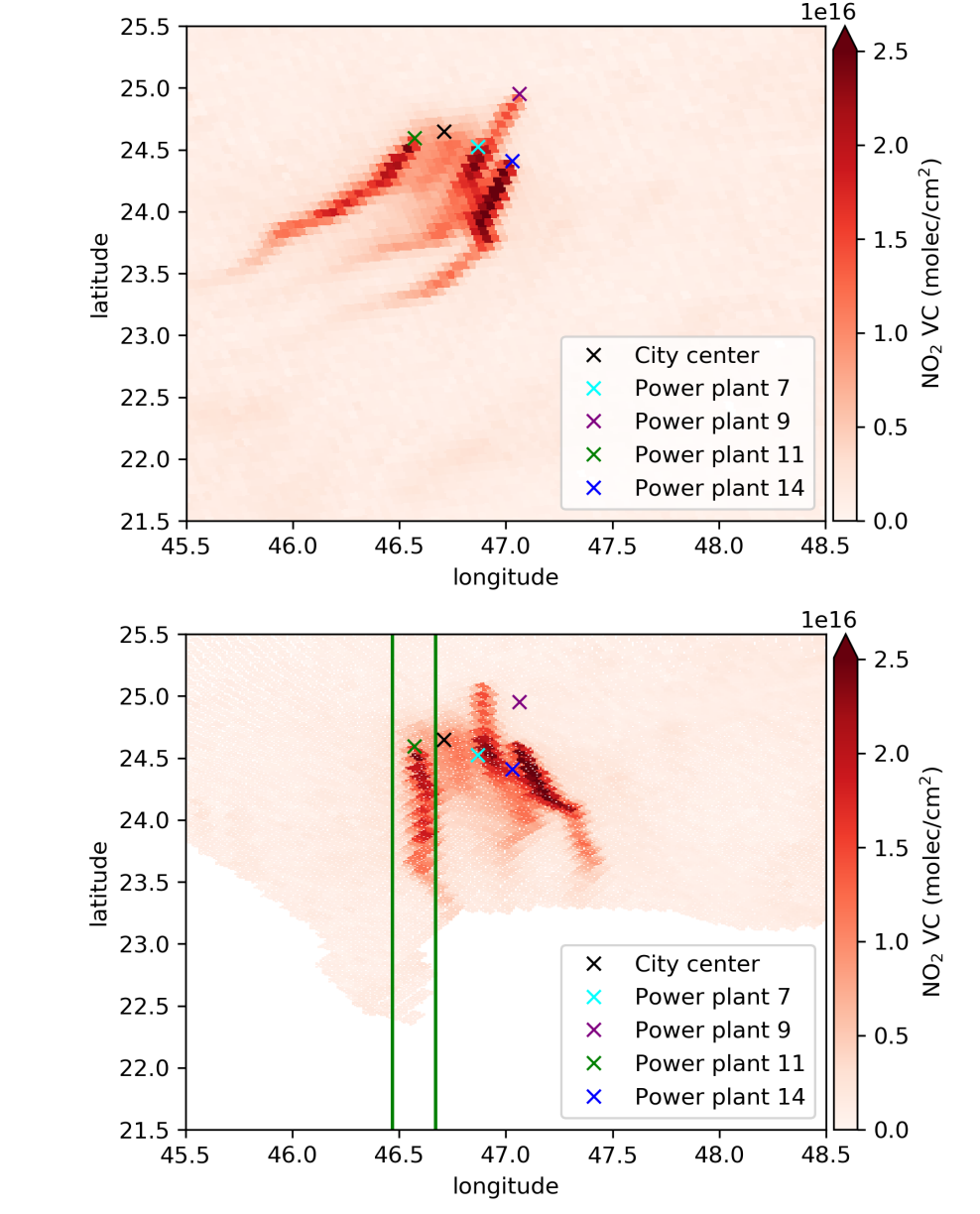


Abb.: Troposphärische Säule NO_2 am 01.07.2018 und Rotation entsprechend der Windrichtung um Kraftwerk 11 auf Nord. Die grünen Linien begrenzen den Bereich zur Berechnung der Liniendichte.

- Lebensdauern zwischen 3 h bis 6 h. Erhöhte Werte bei Einmischungen von Fremdemissionen (Ila).
- Wird der NO_2 -Fluss der fünf Quellen aufsummiert und auf Grundlage eines $[\text{NO}]/[\text{NO}_2]$ Verhältnisses von 0,32 (nach Beierle et al. 2011) in NO_x -Emissionen umgerechnet, ergibt sich ein Wert von 125,44 mol/s.
- Die Emissionen der EDGAR-Datenbank, die bis 2012 vorliegen, liegen für das Jahr 2012 bei 154,65 mol/s.

Zusammenfassung

- TROPOMI ermöglicht die Berechnung von Lebenszeiten und Emissionen aus einem einjährigen Datensatz.
- Es ist möglich einzelne Quellen zu identifizieren und diese zu separieren und separate Betrachtungen für diese durchzuführen.
- Die Summe der für die einzelnen Quellen berechneten Emissionen ist vergleichbar mit Werten aus Emissionsdatenbanken.
- Die Studie soll auf weitere Städte ausgeweitet werden, mit dem Ziel Variationen der Emissionen im Tagesverlauf, wie die Rushhour, zu untersuchen.

Danksagung:
 Die verwendeten operationellen Level 2 TROPOMI NO_2 -Daten werden bereitgestellt durch die ESA im Rahmen des EU Copernicus Programms (<http://www.tropomi.eu/data-products/nitrogen-dioxide>).
 Diese Arbeit wurde im Rahmen des Projekts MAXGRAD durchgeführt, welches vom Deutschen Zentrum für Luft und Raumfahrt (DLR) Bonn finanziert wird.

Ausgewählte Quellen:
 BEIRLE, Steffen, et al. Megacity emissions and lifetimes of nitrogen oxides probed from space. *Science*, 2011, 333. Jg., Nr. 6050, S. 1737-1739
 VEEFKIND, J. P., et al. TROPOMI on the ESA Sentinel-5 Precursor: A GMES mission for global observations of the atmospheric composition for climate, air quality and ozone layer applications. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 120. Jg., S. 70-83.

