

Chemie, Geo- und Klimaforschung

Die Luft über der grünen Lunge Regenwald

Andreae, Meinrat O.; Trebs, Ivonne; Meixner, Franz X.; Kesselmeier, Jürgen; Pöschl, Ulrich

Max-Planck-Institut für Chemie, Mainz
Abteilung – Biogeochemie

Korrespondierender Autor
E-Mail: j.kesselmeier@mpic.de

Zusammenfassung

Der Austausch von reaktiven Spurengasen und Aerosolpartikeln zwischen Biosphäre und Atmosphäre trägt wesentlich zu chemischen und physikalischen Vorgängen in der Atmosphäre bei. Aktuelle Untersuchungen geben Einblick in das Wechselspiel von reaktiven Stickstoffverbindungen, flüchtigen organischen Komponenten und Aerosolbildung. Die Ergebnisse unterstreichen die große Bedeutung des Amazonas-Regenwaldes für das globale Klima und das Erdsystem.

Abstract

The exchange of reactive trace gases and aerosol particles between biosphere and atmosphere contributes substantially to chemical and physical processes in the atmosphere. Recent investigations provide insight into the interplay of reactive nitrogen compounds, volatile organics and aerosol formation. The results underline the major importance of the Amazonian rainforest for the global climate and the Earth system.

Einleitung

Das Amazonasgebiet beheimatet ein Ökosystem von zentraler Bedeutung für unser Klima; es stellt mit einer Fläche von etwa 7 Millionen km² das größte zusammenhängende Waldgebiet unseres Planeten dar. Immer mehr Menschen siedeln in diesem tropischen Regenwald, betreiben dort Brandrodung und Landwirtschaft. Dies wirkt sich in zunehmendem Maße auf den globalen Kohlenstoff- und Wasserkreislauf, die Konzentrationen von Treibhausgasen, Aerosolpartikeln sowie reaktiven Spurengasen und damit auf die Oxidationskraft der Atmosphäre aus. Es ist daher von elementarer Bedeutung, zu verstehen, (1) wie reaktive Spurengase – zum Beispiel Stickstoffverbindungen und organische Kohlenstoffverbindungen – aus biogenen und anthropogenen Quellen freigesetzt werden, (2) wie Pflanzen und Böden die Folgeprodukte aufnehmen und (3) wie die atmosphärische Oxidationskapazität und die Bildung von Aerosolpartikeln dadurch verändert werden.

Reaktiver Stickstoff (Nr)

Der Mensch ist in der Lage, reaktiven Stickstoff, also die so genannten Nr-Verbindungen, direkt aus den Elementen Stickstoff, Wasserstoff oder Sauerstoff zu bilden, Ammoniak (NH₃) über das Haber-Bosch-Verfahren und Stickstoffmonoxid (NO) über Verbrennungsprozesse [1]. Einmal in die Atmosphäre abgegeben, führen komplexe Reaktionen wie zum Beispiel mit Ozon (O₃) zur Umwandlung in andere reaktive Nr-Moleküle wie Stickstoffdioxid (NO₂), salpetrige Säure (HNO₂) oder Salpetersäure (HNO₃). Diese Spurengase bestimmen die atmosphärische Konzentration des OH-Radikals, welches

das wichtigste „Waschmittel“ der irdischen Lufthülle ist. Darüber hinaus kann der Eintrag von Nr-Verbindungen in die Bio- und Hydrosphäre zur Überdüngung bzw. Versauerung von Ökosystemen führen. Pflanzen und Böden nehmen Nr-Verbindungen auf, gleichzeitig erzeugen mikrobielle und/oder physiologische Vorgänge andere Nr-Verbindungen und geben diese an die Atmosphäre ab (**Abb. 1**).

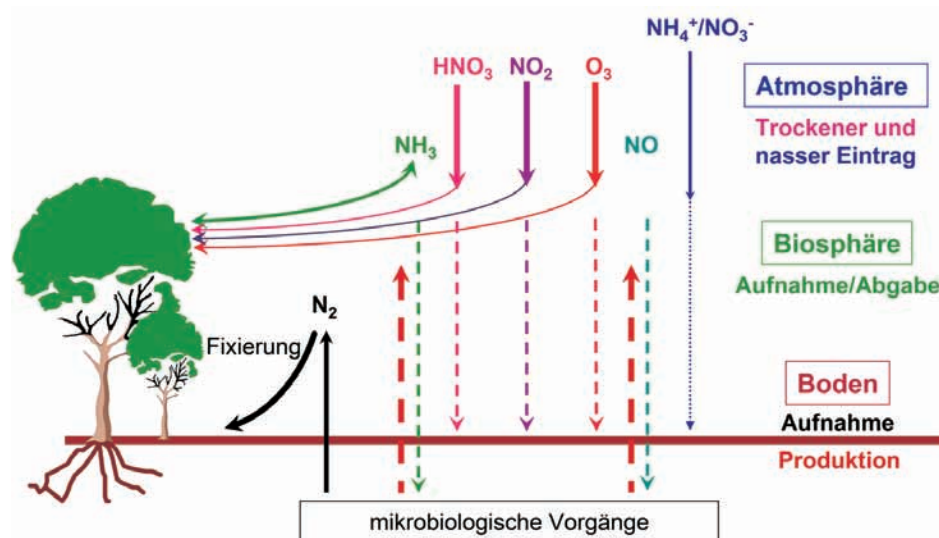


Abb. 1: Vereinfachter Stickstoffkreislauf.

Urheber: Max-Planck-Institut für Chemie

Im Amazonasbecken zerstört die Brandrodung während der Trockenzeit (Juni bis Oktober) große Flächen des Primärregenwalds. Durch die Feuer werden dabei NH_3 und NO freigesetzt und gelangen in die Atmosphäre. Dort werden sie transportiert, chemisch umgewandelt und schließlich wieder in die Biosphäre eingetragen. Um den Nr-Austausch zwischen der Atmosphäre und einem Regenwald-Ökosystem zu quantifizieren, setzen Forscher üblicherweise eine Kombination von luftchemischen und mikrometeorologischen Messtechniken ein. Die obersten Schichten des Waldbodens sind sowohl während der Regen- als auch während der Trockenzeit eine biogene Quelle von NO (**Abb. 2**). Am Tag nimmt allerdings das NO -Mischungsverhältnis mit zunehmender Höhe ab und weist über dem Kronendach die niedrigsten Werte auf [2]. Für die O_3 -Verteilung ergibt sich ein genau umgekehrtes Bild mit hohen O_3 -Mischungsverhältnissen über dem Kronendach und sehr niedrigen am Waldboden.

Der Boden einer benachbarten 20 Jahre alten Viehweide wies bei Messungen eine weitaus geringere biogene NO -Bildung auf und emittierte sechs- bis neunmal weniger NO als der Waldboden. Die höhere Emission aus dem Waldboden bedeutet aber nicht, dass über dem Regenwald auch mehr NO in die Atmosphäre gelangt. Die dichte Vegetation verhindert, dass die Luft schnell ausgetauscht wird. Aufgrund der langen Verweilzeit wird NO durch die Reaktion mit O_3 effektiv in NO_2 umgewandelt. Dieses kann dann sowohl von Blättern als auch vom Boden wieder aufgenommen werden. Etwa 50% des biogen im Regenwaldboden erzeugten NO werden so abgefangen.

Andererseits kann man davon ausgehen, dass der Gesamteintrag von reaktivem Stickstoff aus Brandrodungen in den Wald die biogen verursachten Emissionen aus den Wäldern erheblich übersteigt. Darüber hinaus gibt es erste Hinweise, dass der jährliche Gesamtstickstoffeintrag etwa zwei- bis dreimal größer ist, als globale Modelle momentan berechnen [3]. Deshalb ist die Frage berechtigt, ob man während der Trockenzeit von einer „Düngung“ des Regenwalds durch menschliche Aktivitäten sprechen kann.

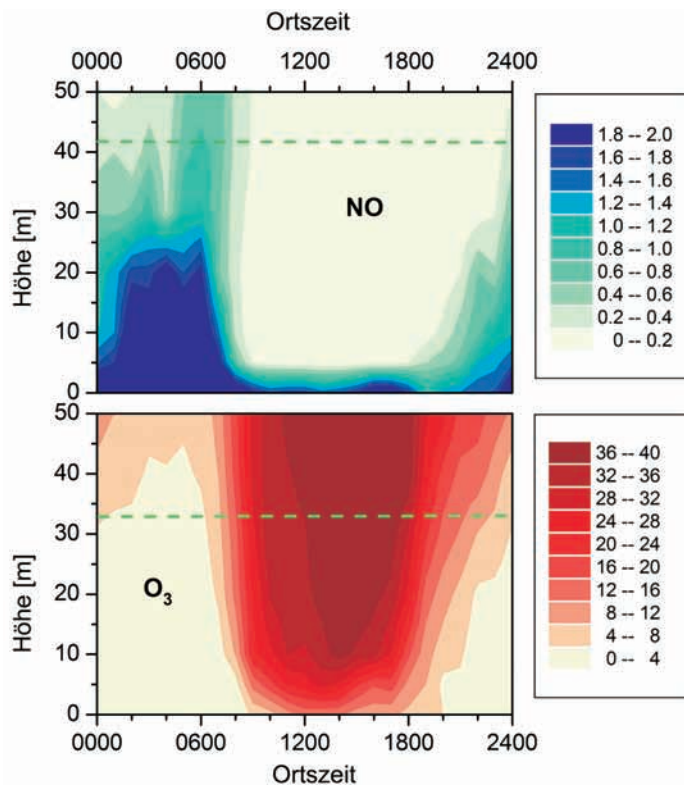


Abb. 2: Tageszeitlicher Verlauf der NO- und O₃-Konzentration (ppb) in und über einem Primärregenwald des Amazonasgebiets (Rondonia).

Urheber: Max-Planck-Institut für Chemie

Biogene flüchtige organische Verbindungen

Die Vegetation ist eine dominante Quelle von flüchtigen organischen Verbindungen (**Volatile Organic Compounds, VOCs**). Die Reaktivität biogener VOCs trägt wesentlich zu chemischen Prozessen und zur Partikelbildung in der Atmosphäre bei. Wenn man die Chemie und Physik der globalen Atmosphäre beurteilen will, ist es daher von elementarer Bedeutung, zu wissen, wie viele VOCs im weltweit größten tropischen Regenwaldgebiet durch welche Prozesse emittiert werden. Ergebnisse aus mittleren Breiten können nicht auf die Tropen übertragen werden, da die Umweltbedingungen sehr verschieden sind und zudem die Biodiversität des Regenwaldes wesentlich höher ist. Daher wäre es hilfreich, möglichst viel über die VOC-Emissionen unterschiedlicher Arten zu lernen. So können die Hintergründe der Austauschprozesse wie zum Beispiel Biosynthese von VOCs, Regulation der Freisetzung von VOCs, saisonales Emissionsverhalten sowie die Relation von Emission zum fotosynthetisch fixierten Kohlenstoff verstanden werden. Diese Erkenntnisse lassen die Modelle zuverlässiger werden.

Verschiedene Baumarten emittieren sehr unterschiedliche Mengen der verschiedenen VOCs, selbst wenn man nur die drei wichtigsten von mehreren hundert VOC-Spezies betrachtet (**Abb. 3**). Die große Anzahl verschiedener VOC-Spezies ist bedingt durch die Ökophysiologie der Arten und die Umweltbedingungen [4]. Das Amazonasgebiet weist dabei eine besondere Eigenart auf: Der Wasserstand des Rio Negro schwankt am Pegel Manaus saisonal um 10 bis 15 Meter. Es handelt sich also um ein pulsierendes System von Überflutung und fallenden Wasserständen. Vegetation und Fauna haben sich an diesen Puls, der das gesamte Amazonasgebiet umfasst, angepasst. Pflanzen reagieren auf Überflutung und die damit verbundene schlechte Sauerstoffversorgung mit Fermentation und

Ethanolproduktion in den Wurzeln. Sie transportieren das Ethanol in die Blätter und oxidieren es dort zu Acetaldehyd und Essigsäure. Alle drei Verbindungen können auch emittiert werden. Zusätzliche Einflüsse auf Emissionen anderer VOC-Spezies und auf Fotosynthese und Atmung sind beobachtet worden. Langzeituntersuchungen all dieser Reaktionen – die Überflutungen im Amazonasgebiet dauern über mehrere Monate – sind bisher nicht vorhanden. Das Verständnis eines fundamentalen Vorgangs im Ökosystem dieses tropischen Regenwalds fehlt also.

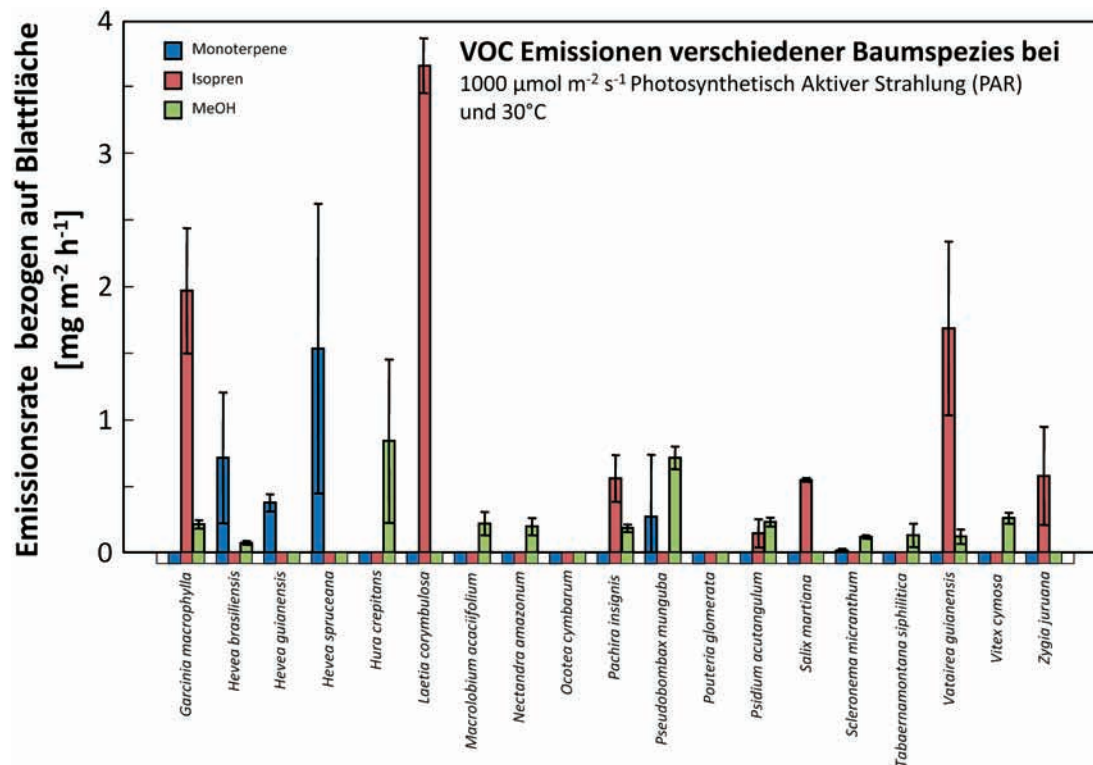


Abb. 3: Emissionsmuster und -raten verschiedener Baumarten (1–2 Jahre alte Setzlinge) im Amazonasgebiet (Bracho-Núñez, Dissertation Universität Mainz, 2010).

Urheber: Max-Planck-Institut für Chemie

Neben den Fragen zur VOC-Emission ist aber auch die Chemie dieser Verbindungen für Überraschungen gut. Kürzlich wurde über atmosphärische Konzentrationsprofile des Isoprens und seiner Oxidationsprodukte über den Waldgebieten bei Manaus berichtet, die sich nicht mit dem bisherigen Chemieverständnis erklären ließen [5]. Erst eine neue Interpretation zum Wechselspiel zwischen OH-Radikalen und dem Isopren könnte die Befunde erklären [6]. Betrachtet man die große Zahl verschiedener VOC-Spezies, wird aber auch schnell klar, dass die Gefahr besteht, wichtige Verbindungen zu übersehen. Hier liegt sicher noch einiges im Dunkeln, was auch beim Verständnis der Produktion von Aerosolpartikeln noch für Überraschungen sorgen könnte.

Primäre biologische und sekundäre organische Aerosolpartikel

Aerosole sind von zentraler Bedeutung für Atmosphäre, Biosphäre, Klima und Gesundheit. Die luftgetragenen Partikel im Nanometer- und Mikrometer-Größenbereich beeinflussen die Energiebilanz und den Wasserkreislauf der Erde sowie die Ausbreitung von Organismen und Ökosystemen. Zusammensetzung und Eigenschaften der Partikel sind jedoch kaum bekannt – insbesondere für biogene Komponenten und in der Atmosphäre über tropischen Regenwäldern [7].

Im Rahmen der Messkampagne AMAZE-08 gelang es Mitarbeitern des MPI für Chemie in Zusammenarbeit mit internationalen Partnern erstmals, atmosphärische Aerosole über dem Amazonas-Regenwald zur Regenzeit mit modernen Messmethoden zu charakterisieren (**Abb. 4**). Die Ergebnisse von AMAZE-08 zeigen, dass die so genannte Feinstaubfraktion ($< 1 \mu\text{m}$), welche die Anzahlkonzentration der Wolkenkondensationskerne bestimmt, überwiegend aus sekundären organischen Aerosolpartikeln (SOA) besteht [8]. Diese SOA bilden sich durch Kondensation der Oxidationsprodukte biogener VOCs. Die Grobstaubfraktion ($> 1 \mu\text{m}$), welche unter anderem für die Eis- und Niederschlagsbildung von Bedeutung ist [9], besteht überwiegend aus primären biologischen Aerosolpartikeln (Pilzsporen, Pflanzenfragmenten etc.).

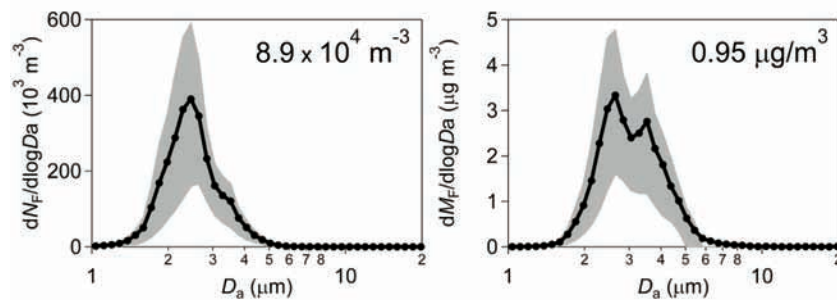


Abb. 4: Konzentration und Größenverteilung der Anzahl (links) und Masse (rechts) primärer biologischer Aerosolpartikel gemessen mit einem aerodynamischen Partikelspektrometer mit Fluoreszenzdetektor (Median und Quartile einer zweiwöchigen Reinluftperiode während AMAZE-08).

Urheber: Max-Planck-Institut für Chemie

Die Anteile von primären biologischen und sekundären organischen Aerosolpartikeln sind viel höher als in anderen Regionen der Welt. Die Gesamtkonzentration von Aerosolpartikeln ist vergleichbar mit ozeanischer Reinluft. Sie liegt um Größenordnungen unter den charakteristischen Werten bevölkerter kontinentaler Regionen – zum Vergleich: Regenwald etwa $100 \text{ Partikel}/\text{cm}^3$, $\approx 1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ und bevölkerte Regionen: $10.000\text{--}100.000 \text{ Partikel}/\text{cm}^3$ und $10\text{--}100 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Aufgrund der andersartigen Aerosol-Zusammensetzung verlaufen die Wechselwirkungen mit Wolken und Niederschlag in Reinluft über Regenwäldern anders als in verschmutzter Luft. Modellstudien zur Bedeutung der neuen experimentellen Daten für Wasserkreislauf und Klima sind derzeit im Gange [10].

Danksagung: Die Autoren danken ihren Kollegen am Max-Planck-Institut für Chemie und den externen Partnern laufender und früherer wissenschaftlicher Projekte für gute Zusammenarbeit und anregende Diskussionen.

Literaturhinweise

- [1] J. N. Galloway, J. D. Aber, J. W. Erisman, S. P. Seitzinger, R. W. Howarth, E. B. Cowling, B. J. Cosby:
The nitrogen cascade.
Bioscience **53**, 341–356 (2003).
- [2] U. Rummel, C. Ammann, A. Gut, F. X. Meixner, M. O. Andreae:
Eddy covariance measurements of nitric oxide flux within an Amazonian rain forest.
Journal of Geophysical Research-Atmospheres **107** (D20), 8050 (2002);
doi:10.1029/2001JD000520.
- [3] I. Trebs, L. S. Lara, L. M. Zeri, L. V. Gatti, P. Artaxo, R. Dlugi, J. Slanina, M. O. Andreae, F. X. Meixner:
Dry and wet deposition of atmospheric inorganic nitrogen in a tropical environment (Rondonia, Brazil).
Atmospheric Chemistry and Physics **6**, 447–469 (2006).
- [4] J. Kesselmeier, M. Staudt:
Biogenic volatile organic compounds (VOC): an overview on emission, physiology and ecology.
Journal of Atmospheric Chemistry **33**, 23–88 (1999).
- [5] U. Kuhn, M. O. Andreae, C. Ammann, A. C. Araújo, E. Brancaleoni, P. Ciccioli, T. Dindorf, M. Frattoni, L. V. Gatti, L. Ganzeveld, B. Kruijt, J. Lelieveld, J. Lloyd, F. X. Meixner, A. Nobre, U. Pöschl, C. Spirig, P. Stefani, A. Thielmann, R. Valentini, J. Kesselmeier:
Isoprene and monoterpene fluxes from Central Amazonian rainforest inferred from tower-based and airborne measurements, and implications on the atmospheric chemistry and the local carbon budget.
Atmospheric Chemistry and Physics **7**, 2855–2879 (2007).
- [6] J. Lelieveld, T. M. Butler, J. N. Crowley, T. J. Dillon, H. Fischer, L. Ganzeveld, H. Harder, M. G. Lawrence, M. Martinez, D. Taraborrelli, J. Williams:
Atmospheric oxidation capacity sustained by a tropical forest.
Nature **452**, 737–740 (2008).
- [7] M. O. Andreae:
Aerosols before pollution.
Science **315**, 50–51 (2007).
- [8] S. S. Gunthe, S. M. King, D. Rose, Q. Chen, P. Roldin, D. K. Famer, J. L. Jimenez, P. Artaxo, M. O. Andreae, S. T. Martin, U. Pöschl:
Cloud condensation nuclei in pristine tropical rainforest air of Amazonia: size-resolved measurements and modeling of atmospheric aerosol composition and CCN activity.
Atmospheric Chemistry and Physics **9**, 7551–7575 (2009).
- [9] A. J. Prenni, M. D. Petters, S. M. Kreidenweis, C. L. Heald, S. T. Martin, P. Artaxo, R. M. Garland, A. G. Wollny, U. Pöschl:
Relative roles of biogenic emissions and Saharan dust as ice nuclei in the Amazon basin.
Nature Geoscience **2**, 402–405 (2009).
- [10] P. Reutter, H. Su, J. Trentmann, M. Simmel, D. Rose, S. S. Gunthe, H. Wernli, M. O. Andreae, U. Pöschl:
Aerosol- and updraft-limited regimes of cloud droplet formation: influence of particle number, size and hygroscopicity on the activation of cloud condensation nuclei (CCN).
Atmospheric Chemistry and Physics **9**, 7067–7080 (2009).