

## CARIBIC, ein fliegendes Observatorium zur effizienten Erkundung der globalen Atmosphärenchemie

Brenninkmeijer, Carl A. M.

Max-Planck-Institut für Chemie, Mainz

Korrespondierender Autor

Email: [carl.brenninkmeijer@mpic.de](mailto:carl.brenninkmeijer@mpic.de)

---

### Zusammenfassung

Die Erdatmosphäre ist ein komplexes System, in der eine Vielzahl physikalischer und chemischer Prozesse ablaufen. Um dieses System verstehen zu können, müssen verschiedenste Gase in sehr geringen Mengen gemessen werden. Dies bedeutet nicht nur den Einsatz verschiedenster Messgeräte. Um chemische Veränderungen der Atmosphäre nachvollziehen zu können, muss auch regelmäßig, langfristig und global gemessen werden. Das MPI für Chemie hat daher in Zusammenarbeit mit Lufthansa einen einzigartigen Messcontainer entwickelt, der monatlich als Luftfracht auf Langstreckenflügen Messungen durchführt.

### Abstract

The Earth's atmosphere is a complex system with a multitude of physical and chemical processes. To better understand this system a wide range of gases present at very low concentrations must be measured. This not only means the use of a range of measurement equipment. To track chemical changes in the atmosphere, long term, regular measurements on a global scale are needed. The Max Planck Institute for Chemistry has in cooperation with Lufthansa Airlines developed a unique measurement container which carries out measurements on a monthly basis as airfreight during long range flights.

Man kann die Erdatmosphäre wie einen riesigen, flachen und äußerst komplexen chemischen Reaktor betrachten. Wetterphänomene wie Konvektion, Tiefdruckgebiete oder Passatwinde funktionieren hierbei wie ein wirbelndes Rührwerk – von der kleinsten bis zur globalen Dimension. Die Energie für das Rührwerk liefert die Sonne in Form von Licht und Wärme. Die Chemie im Reaktor wird jedoch durch UV-Licht angetrieben. Diese energiereichere Strahlung

initiiert zahllose chemische Reaktionen. Diese Reaktionen und auch manche mikrophysikalische Prozesse finden in der Gasphase, aber auch auf der Oberfläche von Partikeln (Aerosolen) und in Wolkentröpfchen statt. Wichtig ist, dass neben Treibhausgasen auch Aerosole und Wolken das Klima auf der Erde beeinflussen.

Die chemischen Bestandteile im Reaktor "Atmosphäre" werden an der Erdoberfläche emittiert und verteilen sich lokal, regional und teilweise auch weltweit. Hierbei handelt es sich um Aerosole wie Feinstaub und auch um Spurengase, aus denen sich wiederum Aerosole bilden können. So gelangen etwa 500 Millionen Tonnen Methangas pro Jahr in die Atmosphäre. Da nicht die gleiche Menge chemisch abgebaut wird, erhöht sich die Methankonzentration nahezu stetig und verstärkt den Treibhauseffekt. Ein Methanmolekül verbleibt durchschnittlich etwa zehn Jahre in der Atmosphäre. Deswegen weist die Methankonzentration global nur kleine Unterschiede auf, die man jedoch genau messen muss, um die Quellen dieses Gases wie Sümpfe und Reisfelder zu erfassen.

Im Gegensatz zu Methan ist der Kohlenwasserstoff Isopren schnell abbaubar. Isopren zeigt deswegen enorme Konzentrationsunterschiede und verteilt sich im Gegensatz zu Methan nicht weltweit. Es wird von Pflanzen gebildet und emittiert. Die Emissionen belaufen sich auf etwa 400 Millionen Tonnen pro Jahr und belasten wie die Methanemissionen das selbstreinigende chemische System der Erdatmosphäre. Beide Gase müssen durch komplexe Oxidationsprozesse abgebaut werden. Nicht chemisch abbaubar ist jedoch das bekannte Treibhausgas Kohlendioxid. Jedes Jahr werden etwa 30 Milliarden Tonnen (d. h. etwa 4.000 Kilogramm pro Kopf der Weltbevölkerung, Tendenz leider steigend) durch die Verbrennung fossiler Energieträger wie Steinkohle, Erdöl und Erdgas freigesetzt. Nur die Hälfte dieser  $\text{CO}_2$ -Menge wird durch Photosynthese von Pflanzen und von Plankton in den Ozeanen aus der Erdatmosphäre entfernt.

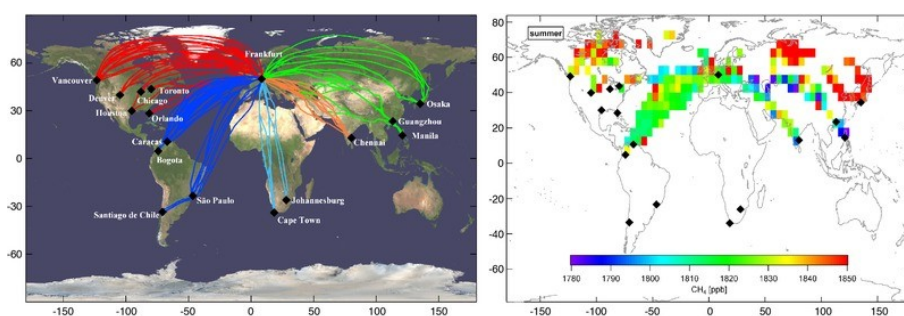
Im Hinblick auf die enormen Dimensionen der Atmosphäre, ihrer Komplexität und Variabilität in Verbindung mit verschiedenen Prozessen, die an der Erdoberfläche ablaufen (z. B. Waldrodung, Erosion, Emissionen der Großstädte), sind ausgeklügelte Systeme für die Erforschung und Überwachung der Atmosphäre notwendig. Zu diesem Zweck wurde CARIBIC (Civil Aircraft for the Regular Investigation of the atmosphere Based on an Instrument Container) als fliegendes Observatorium zur Erforschung der Chemie der Atmosphäre vom Max-Planck-Institut für Chemie in Mainz entwickelt [1].



**Abb. 1:** Der Lufthansa Airbus A340-600 „Leverkusen“ (links), das Einlasssystem mit drei Einlassrohren (Mitte) und der 1,6 Tonnen schwere Messcontainer mit Geräten (rechts).

© Max-Planck-Institut für Chemie / Brenninkmeijer

Der Träger von CARIBIC ist ein Lufthansa Airbus A340-600 – das Langstreckenflugzeug "Leverkusen" (**Abb. 1**). Das Observatorium besteht aus einem kompakten, automatischen Labor, das in einen modifizierten Luftfrachtcontainer integriert wurde (Abb. 1). Es ist mit über 18 Geräten zur chemisch-physikalischen Analyse und zur Probennahme von Luft und Aerosol-Partikeln bestückt. Pro Einsatz werden 116 Luftproben genommen. Der zum Messcontainer umgewandelte Luftfrachtcontainer wird monatlich für vier aufeinanderfolgende Langstreckenflüge am Flughafen Frankfurt in den vorderen Frachtraum der "Leverkusen" eingebaut. Der Container fliegt dann beispielsweise von Frankfurt nach Caracas in Venezuela und nach kurzem Aufenthalt zurück nach Frankfurt. Anschließend fliegt er weiter nach Chennai in Indien und abermals zurück nach Frankfurt, wo der Messcontainer wieder ausgebaut wird. Während des Flugs wird die Außenluft über integrierte Düsen mithilfe eines Einlasssystems (Abb. 1) am Bauch des Flugzeugs angesaugt und zum Container transportiert. Im Einlasssystem befindet sich außerdem eine Kamera und ein Fernerkundungssystem. Die analytischen Geräte im Container messen kontinuierlich u. a. Ozon, Wasserdampf, Wolkenwasser, Stickoxide, Kohlenmonoxid, Nanometer bis Mikrometer große Aerosolpartikel, Kohlendioxid, Methan, gasförmiges Quecksilber. Die Luftproben werden im Labor analysiert auf alle Treibhausgase, FCKWs und Kohlenwasserstoffe. Die Aerosol-Proben werden auf Schwefel und viele andere chemische Elemente untersucht. Seit 2005 ist das einzigartige CARIBIC-Observatorium regelmäßig in Betrieb und hat bisher wertvolle Messdaten von über zwei Millionen Kilometern Flugstrecke liefern können.

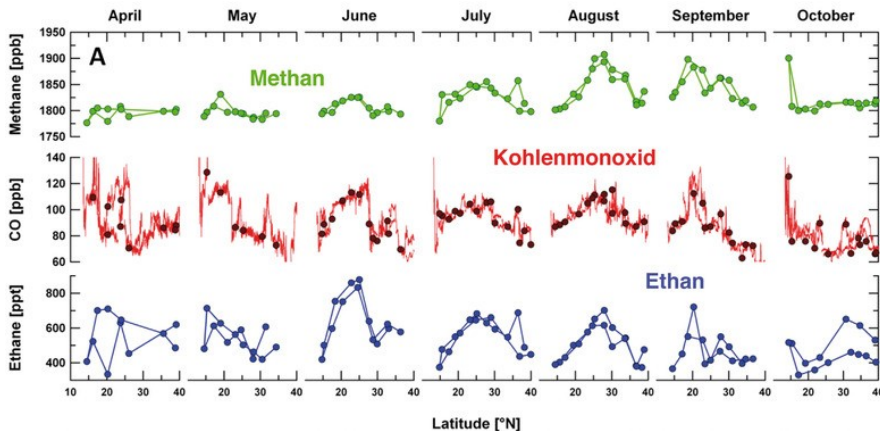


**Abb. 2:** Die CARIBIC-Flugrouten und die gemessene Verteilung von Methan (CH<sub>4</sub>) in der Flughöhe von 10-12 km.

© Max-Planck-Institut für Chemie / Brenninkmeijer

Methan ist das zweitwichtigste Treibhausgas. Um berechnen zu können, welchen Umfang Methan-Quellen wie Sümpfe, Reisfelder, Mülldeponien und Wiederkäuer haben und wie sie über die Kontinente verteilt sind, werden präzise weltweite Messungen benötigt. Die Methandaten, die CARIBIC liefert (**Abb. 2**), sind für viele Regionen der Erde, insbesondere in mehreren Kilometern Höhe, zurzeit der einzige systematische Datensatz. Um das globale Methan-Budget

besser zu quantifizieren, werden diese Daten von verschiedenen Forschungsinstitutionen weltweit benutzt. Anhand der Luftproben, die während des Fluges genommen werden, kann man im Labor viele weitere Gase sehr präzise messen.



**Abb. 3:** Die Konzentrationen von Methan ( $\text{CH}_4$ ), Kohlenmonoxid ( $\text{CO}$ ) und Ethan ( $\text{C}_2\text{H}_6$ ) in Abhängigkeit der geografischen Breite von April bis Oktober. Im Sommer steigt die Methankonzentration an, obwohl die Kohlenmonoxid-Konzentration konstant bleibt. Die maximalen Werte für Methan werden im August über dem Iran gemessen. Das zusätzliche Methan kommt jedoch hauptsächlich aus Indien.

© Max-Planck-Institut für Chemie / Brenninkmeijer

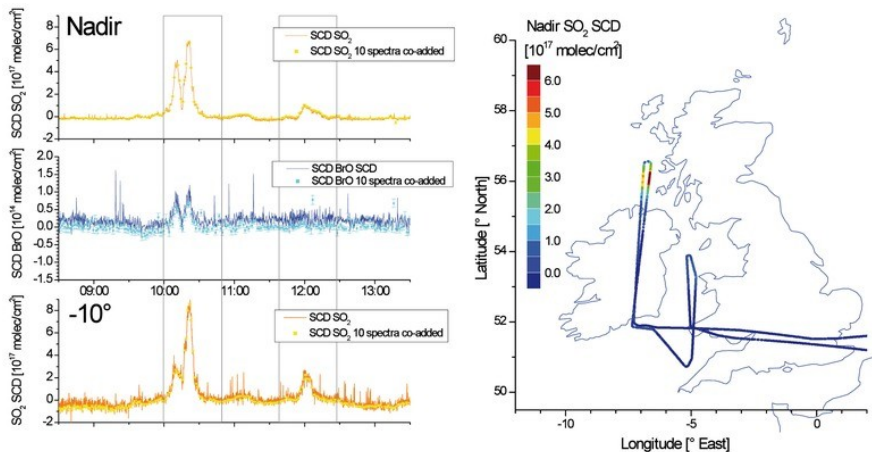
Ein großer Vorteil von CARIBIC ist, dass viele Messwerte simultan erfasst werden. Nicht nur die oben erwähnten Treibhausgase, sondern auch Kohlenwasserstoff- oder Kohlenmonoxid-Konzentrationen werden gemessen (**Abb. 3**). Solche Kombinationsmessungen ermöglichen detaillierte Schlussfolgerungen über die Quellen unterschiedlichster Spurengase. Ein gutes Beispiel ist der Monsun in Indien. CARIBIC stellte systematisch erhöhte Methan-Werte auf den Flügen zwischen Frankfurt und Chennai fest, und das über eine Distanz von mehr als 3.000 Kilometern zwischen dem Mittleren Osten und Südindien [2,3]. Während der Sommermonsun in Südasien heftige Regenfälle bringt und unter anderem in Reisfeldern verstärkt Methan entsteht, befördert großskalige Konvektion bodennahe, mit Methan angereicherte Luft auf Flughöhe. Aus dem Verhältnis von Methan zu Kohlenmonoxid und zu Ethan kann dann abgeschätzt werden, wie viel Methan emittiert wird. Die geschätzte Menge übertrifft die Methan-Produktion in den Reisfeldern um ein Vielfaches. Dies deutet auf große Methan-Emissionen aus Mülldeponien, Abwasserkanälen und weiteren schwer zu erfassenden Quellen dieses Gases hin.

Eine wichtige Säule der Beobachtung der globalen Atmosphäre ist die Fernerkundung mittels Satelliten. Hierzu bietet CARIBIC eine hervorragende Ergänzung, da

1. die Satellitenmessungen während der Langstreckenflüge kalibriert werden können,
2. Wolken die Messungen aus einem Flugzeug nicht behindern,

3. die Geräte an Bord des Flugzeugs viele zusätzliche Spurengase messen können, die für Satelliten de-facto "unsichtbar" sind und

4. man vom Flugzeug aus Luft- und Aerosolproben für präzise Labormessungen nehmen kann, was besonders für die Treibhausgas-Forschung wichtig ist.



**Abb. 4:** Messungen von Schwefeldioxid ( $\text{SO}_2$ ) und Bromoxid (BrO) in der Vulkanwolke des Eyjafjallajökulls. Das Teleskop ist nach unten gerichtet (Nadir) und detektierte die beiden Gase. Das rechte Bild zeigt die Flugroute, farbkodiert nach den erhöhten Schwefeldioxid-Werten nördlich von Irland, kurz vor der damaligen Schließung des Luftraums über Irland und England.

© Max-Planck-Institut für Chemie / Brenninkmeijer

Der Ausbruch des isländischen Vulkans Eyjafjallajökull im Jahr 2010 war ein guter Test, inwieweit die CARIBIC-Messungen die Satellitenmessungen ergänzen [4,5]. Während eines Sonderflugs über die Britischen Inseln konnte zum ersten Mal nachgewiesen werden, dass Chloratome in einer Vulkanwolke vorhanden sind. Darüber hinaus hat das Fernerkundungssystem von CARIBIC, das mithilfe einer Optik im Einlasssystem mit der gleichen Technik arbeitet wie viele Satelliten, Schwefeldioxid und Bromoxid nachweisen können (**Abb. 4**).

CARIBIC ist das einzige Messsystem dieser Art. Der Gedanke, ein Passagierflugzeug zu benutzen, um ein kompaktes Labor preiswert zu transportieren und so ein fliegendes Observatorium zu gestalten, wurde in enger Zusammenarbeit mit Lufthansa und Lufthansa Technik erfolgreich in die Praxis umgesetzt. Um Fortschritte im Verständnis vieler klimarelevanter Prozesse zu erzielen, ist dieses System für die Atmosphärenforschung äußerst wertvoll. Das Projekt CARIBIC wird auch gefördert durch Fraport AG. Neben dem Max-Planck-Institut für Chemie wird CARIBIC auch vom Leibniz-Institut für Troposphärenforschung in Leipzig, dem Institut für Meteorologie und Klimaforschung des Karlsruher Instituts für Technologie, dem Institut für Physik der Atmosphäre des Deutschen Luft- und Raumfahrt-Zentrums in Oberpfaffenhofen, dem Helmholtz-Forschungszentrum in Geesthacht, dem Institut

für Umweltphysik der Universität Heidelberg und fünf weiteren Forschungseinrichtungen in Europa genutzt und weiterentwickelt.

**Weitere Informationen unter [www.caribic.de](http://www.caribic.de)**

## Literaturhinweise

- [1] Brenninkmeijer, C. A. M.; Crutzen, P.; Boumard, F.; Dauer, T.; Dix, B.; Ebinghaus, R.; Filippi, D.; Fischer, H.; Franke, H.; Frieß, U.; Heintzenberg, J.; Helleis, F.; Hermann, M.; Kock, H. H.; Koepfel, C.; Lelieveld, J.; Leuenberger, M.; Martinsson, B.; Miemczyk, S.; Moret, H. P.; Nguyen, H. N.; Nyfeler, P.; Oram, D.; O'Sullivan, D.; Penkett, S.; Platt, U.; Pupek, M.; Ramonet, M.; Randa, B.; Reichelt, M.; Rhee, T. S.; Rohwer, J.; Rosenfeld, K.; Scharffe, D.; Schlager, H.; Schumann, U.; Slemr, F.; Sprung, D.; Stock, P.; Thaler, R.; Valentino, F.; van Velthoven, P.; Waibel, A.; Wandel, A.; Waschitschek, K.; Wiedensohler, A.; Xueref-Remy, I.; Zahn, A.; Zech, U.; Ziereis, H.  
Civil Aircraft for the Regular Investigation of the atmosphere Based on an Instrumented Container: The new CARIBIC system  
Atmospheric Chemistry and Physics 7, 4953-4976 (2007)
- [2] Schuck, T. J.; Brenninkmeijer, C. A. M.; Baker, A. K.; Slemr, F.; van Velthoven, P. F. J.; Zahn, A.  
Greenhouse gas relationships in the Indian summer monsoon plume measured by the CARIBIC passenger aircraft  
Atmospheric Chemistry and Physics 10, 2031-2087 (2010)
- [3] Patra, P.; Niwa, Y.; Schuck, T. J.; Brenninkmeijer, C. A. M.; Machida, T.; Matsueda, H.; Sawa, Y.  
Carbon balance of South Asia constrained by passenger aircraft CO<sub>2</sub> measurements  
Atmospheric Chemistry and Physics 11, 4163-4175 (2011)
- [4] Baker, A. K.; Rauthe-Schöch, A.; Schuck, T. J.; Brenninkmeijer, C. A. M.; van Velthoven, P. F. J.; Wiser, A.; Oram, D. E.  
Investigation of chlorine radical chemistry in the Eyjafjallajökull volcanic plume using observed depletions in non-methane hydrocarbons  
Geophysical Research Letters 38, L13801, DOI: 10.1029/2011GL047571 (2011)
- [5] Heue, K.-P.; Brenninkmeijer, C. A. M.; Baker, A. K.; Rauthe-Schöch, A.; Walter, D.; Wagner, T.; Hörmann, C.; Sihler, H.; Dix, B.; Frieß, U.; Platt, U.; Martinsson, B. G.; van Velthoven, P. F. J.; Hermann, M.; Zahn, A.; Ebinghaus, R.  
SO<sub>2</sub> and BrO observation in the plume of the Eyjafjallajökull volcano 2010: CARIBIC and GOME-2 retrievals  
Atmospheric Chemistry and Physics 11, 2973-2989 (2011)