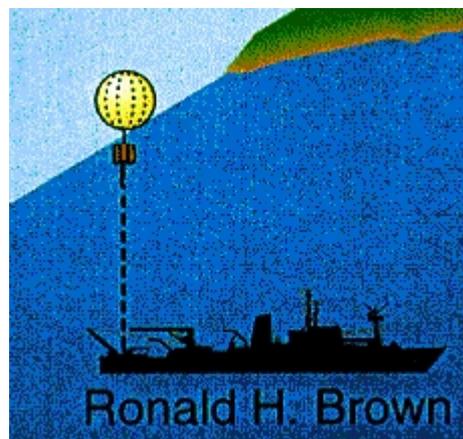
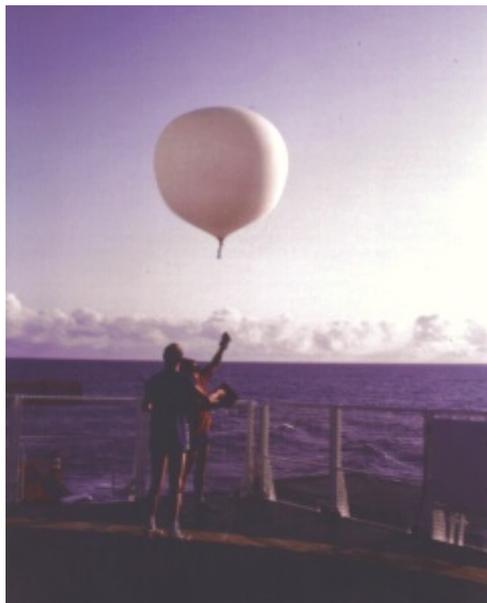


INDOEX



Kurzbeschreibung Indian Ocean Experiment (INDOEX)

*D.Kley und H. G.J. Smit
Institut für Chemie und Dynamik der Geosphäre (ICG-2)
Forschungszentrum Jülich
Postfach 1913, D-52425 Jülich*

Einleitung

Die Wechselwirkung zwischen Ozean und Atmosphäre ist der Hauptgrund für die natürlichen Klimaschwankungen auf Zeitskalen von Monaten bis hin zu mehreren Jahrzehnten. Die Wechselwirkung spielt eine wichtige Rolle in Klimamodellen, in denen geeignete Parametrisierungen für eine Zahl von Prozessen gefunden werden müssen, deren geringe räumliche Ausdehnung oder zeitliche Intermittenz eine explizite Repräsentation in den Modellen oftmals unmöglich machen.

In den Tropen ist die Kumulonimbuskonvektion (Cb-Konvektion) der Mechanismus, der mehr als die Hälfte zum Energiehaushalt der Hadleyzirkulation beiträgt. Die unverdünnten Kerne der Cb-Konvektion haben eine Ausdehnung von nur etwa 25 km^2 . Ihre Zahl im tropischen Troggebiet ist insgesamt 1600 - 2000 zu jeder Zeit, so daß der Energietransport nur auf etwa 0.1% der äquatorialen Troglfläche vonstatten geht. Die Aufstiegs geschwindigkeit der Kumulonimben ist $2\text{-}3 \text{ ms}^{-1}$. Wegen der Kleinräumigkeit und des sich daraus ergebenden enormen Rechenaufwands wird es noch auf lange Zeit unmöglich sein, Klimamodelle mit einer räumlichen und zeitlichen Auflösung auf der Kumulonimbusskala zu betreiben.

Wichtiger als die Beschränkung wegen des Rechenaufwandes ist allerdings die noch ungenügend verstandene Physik der Kumulonimbuskonvektion. Darüber hinaus sind es die Ozean-Atmosphäre Wechselwirkungen, die zu einer quantitativen Beschreibung der Kumuluskonvektion notwendigerweise bekannt sein müssen. Die wesentlichen Unbekannten sind hier die Wechselwirkungen zwischen Oberflächenerwärmung, Strahlungsabkühlung der Meeresoberfläche, Verdunstung und Cb-Konvektion.

Während die Energetik dieser Vorgänge weder auf der Mikro- noch auf der Mesoskala genügend aufgeklärt ist, sind die mit der Konvektion gekoppelten Stoffströme noch weniger bekannt. Wasserdampf trägt zum natürlichen Treibhauseffekt mehr als 80% bei. Trotz dieser überragenden Bedeutung des Wasserdampfes für den Klimaantrieb sind wichtige Einzelheiten bei den Vertikaltransportprozessen des Wasserdampfes fast unbekannt. So gibt es z.B. eine wissenschaftliche Auseinandersetzung darüber, ob die Cb-Konvektion die obere tropische Atmosphäre befeuchtet oder trocknet.

Ein weiterer Bereich mit vielen Unbekannten in Bezug auf Klimaantrieb sind die Wolken. Der Einfluß der Wolken auf das Klima ist eine der größten Unsicherheiten bei der Vorhersage zukünftiger Klimaänderungen. Es steht außer Zweifel, daß Cb-Konvektion durch die Erwärmung der Meeresoberfläche verursacht wird und daß die Luft im Skalenbereich der Konvektion mit Wasserdampf beladen wird. Da Wasserdampf die von der Meeresoberfläche ausgehende Infrarotstrahlung absorbiert, führt die Cb-Konvektion dazu, daß zusätzliche Wärme in Gebieten mit Cb-Konvektion eingefangen wird. Die Folge ist eine positive Rückkopplung und der "Supertreibhauseffekt". Der Supertreibhauseffekt wurde erstmalig im **Central Equatorial Pacific Experiment (CEPEX)** direkt gemessen. CEPEX hat auch Prozesse identifiziert, die den Supertreibhauseffekt limitieren. Zum Beispiel wird durch den Supertreibhauseffekt die räumliche Ausdehnung der Cirruswolkendecke vergrößert. Die Cirren reflektieren Teile der ankommende Solarstrahlung, was die Meeresoberflächentemperatur daran hindert, noch weiter anzusteigen. Dieses ist, vereinfacht dargestellt, die Thermostathypothese von Ramanathan und Collins (1991). Die Hypothese vermag zwei für das heutige Klima wichtige Beobachtungen zu erklären:

1. Warum sind die maximalen Meeresoberflächentemperaturen so nahe an der 300K Marke, die die Schranke für Cb-Konvektion darstellt?
2. Welche Prozesse limitieren die Temperatur auf 300K?

Die Thermostathypothese besagt, daß die Cb-Konvektion einsetzt, wenn die Temperatur der Meeresoberfläche (SST) auf einen bestimmten Wert angewachsen ist. Die sich über Tausende von km² ausbreitende Cirrusschicht vermag die Meeresoberfläche genügend abzuschatten, so daß die SST nahe bei 300K verharrt.

Das CEPEX Experiment hat wesentlich dazu beigetragen, eine derzeitig kontrovers diskutierte Hypothese aufzustellen. Gleichzeitig (SCIENCE, 27 Januar, 1995) erschienen zwei Artikel (Ramanathan et al., Cess et al.). Cess et al. zeigten, daß an 5 geographisch verschiedenen Meßstellen die Absorption solarer Strahlung durch Wolken um etwa 25 Wm⁻² größer war als von theoretischen Modellen vorhergesagt. Ramanathan et al. beschreiben ähnliche Ergebnisse, die während CEPEX über dem tropischen Pazifik gewonnen wurden. Diese Autoren schlossen, daß der kurzwellige Strahlungsantrieb der Wolken in jener Gegend groß ist, etwa 100 Wm⁻², und daß diese Größe, verglichen mit dem Wert am oberen Rand der Atmosphäre, um den Faktor 1.5 größer ist.

Die obigen Resultate werden, falls sie sich als richtig herausstellen sollten, sehr wichtige Implikationen für die Zirkulationsmodelle haben, die in der Klimaforschung benutzt werden.

Atmosphärische Chemie und chemischer Transport

Kley et al. (SCIENCE, in press 1996) haben in CEPEX eine wichtige Entdeckung bezüglich des Ozongehalts der Troposphäre über dem zentralen equatorien Pazifik gemacht. In jenem Gebiet sind die bodennahen NO_x Konzentrationen außerordentlich gering, so daß photochemische Ozonbildung nicht stattfindet. Das führt dazu, daß die Luft der planetaren Grenzschicht über dem Meer (MBL) fast frei von Ozon ist.

Konzentrationen von ≤ 10 ppb wurden regelmäßig gemessen. Überraschend jedoch war die Beobachtung, daß auch die obersten Schichten der Troposphäre über Gebieten mit starker Konvektion durch äußerst geringe Ozonkonzentrationen gekennzeichnet waren. Die Erklärung dafür ist wohl hauptsächlich darin zu suchen, daß die Cb-Konvektion Luftmassen aus der MBL direkt, ohne größere Mischung, in die oberste Troposphäre verfrachtet. Die geringen Ozonkonzentrationen sind einerseits ein Tracer für die Natur der Cb-Konvektion. Andererseits ergeben sich wichtige Implikationen für die Chemie der Troposphäre. Vergleicht man nämlich die chemischen Lebensdauern von chemisch oxidablen Substanzen unter diesen Bedingungen

mit den Austauschzeiten der MBL Luft in Bezug auf den Vertikaltransport, so findet man, daß auch chemisch kurzlebige Substanzen, wie das wichtige Dimethylsulfid, $((\text{CH}_3)_2\text{S})$, in Gebieten mit starker Konvektion in die obere Troposphäre gelangen können, wo sie durch Oxidation Aerosole und damit Wolkenkondensationskeime (CCN) bilden können.

Relation zur physikalischen Ozeanographie

Die Strahlungs- und dynamischen Prozesse, die die Meeresoberfläche mit der Atmosphäre koppeln, können nicht ohne eine weitergehende Betrachtung der ozeanischen Deckschicht bleiben. Als Antwort auf die atmosphärischen Vorgänge, z.B Wind, solare Einstrahlung, die durch Wolken modifizierte infrarote Abstrahlung, ändern sich Turbulenzgrad der Deckschicht, Temperaturprofil, Salzgehalt etc. Zu einem integralen Verständnis der oben beschriebenen Prozesse und den Wechselwirkungen überhaupt müssen auch die in der Deckschicht stattfindenden physikalischen Vorgänge quantitativ gemessen und verstanden sein.

Ozean - Atmosphäre Wechselwirkung

Das Studium der Ozean-Atmosphäre Wechselwirkung bedarf dreier verschiedener Disziplinen der Geowissenschaften: Klimaforschung, Physikalische Ozeanographie sowie Atmosphärische Chemie. Zur Vorhersage von Klimaänderungen, seien sie natürlicher oder anthropogener Natur, müssen die Aussagen von Klimamodellen angewandt werden. Abgesehen von der Untersuchung von klimarelevanten Prozessen, deren Verständnis notwendig zur Beschreibung des Ist-Zustandes ist, ist zur Vorhersage von Klimaänderungen in der Zeit die Antwort des Systems auf externe Antriebe notwendig. Es ist allgemein akzeptiert, daß sich die Antwort des Klimasystems aufgrund nichtlinearer Rück- und Gegenkopplungen nur schwer (oder vielleicht gar nicht?) aus dem Studium des Ist-Zustands ableiten läßt. Nichtdestoweniger ist das integrale Verständnis des Ist-Zustands, basierend auf der detaillierten Untersuchung einzelner Prozesse und Mechanismen, die wichtigste Voraussetzung für die Schaffung immer besserer Klimamodelle und auch der einzuschlagende Weg zu einem zeitabhängigen Systemverständnis. CEPEX hatte als Untersuchungsgebiet die natürliche, anthropogen nicht belastete Atmosphäre des zentralen Pazifiks. Die CEPEX Resultate machen wichtige Aussagen hinsichtlich der dominanten Rolle des Wasserdampfs beim Treibhauseffekt. Sie erlauben aber keine Rückschlüsse auf mögliche Antworten des Systems, wie sie sich als Folge eines externen anthropogenen Antriebs ergeben könnten.

Das Indian Ocean Experiment (INDOEX)

Basierend auf den CEPEX Ergebnissen, also insbesondere der Thermostathypothese, der exzessiven solaren Wolkenabsorption, des "Kurzschlusses" zwischen MBL und oberster Troposphäre, und ergänzt durch die Aufnahme der Untersuchung des anthropogenen Strahlungsantriebs durch Sulfatpartikel wurde das Konzeptpapier **Indian Ocean Experiment (INDOEX)** von einer Gruppe von Wissenschaftlern vorgeschlagen (V. Ramanathan, P.J. Crutzen, M.O. Andreae, J. Coakley, R. Dickerson, J. Heintzenberg, A. Heymsfeld, J.T. Kiehl, D. Kley, T.N. Krishnamurti, J. Kuettner, J. Lelieveld, S.C. Liu, A.P. Mitra, J. Prospero, R. Sadourny, A.F. Tuck and F.P.J. Valero).

INDOEX und seine Ziele

INDOEX ist ein auf den indischen Ozean fokussiertes Feldexperiment, dessen Zielsetzung ein vertieftes Verständnis der Wechselwirkung zwischen Ozean, Atmosphäre und Strahlungsfeld ist. INDOEX baut auf den in CEPEX gefundenen und in der Einleitung kurz vorgestellten Ergebnissen und Erkenntnissen auf. In INDOEX soll versucht werden, Beiträge zu den folgenden drei, im Zusammenhang stehenden Themen zu liefern:

- Die Bewertung der Bedeutung von Sulfat- sowie anderer kontinentaler Aerosole in Bezug auf den Strahlungsantrieb.
- Die Bestimmung der Größe der solaren Absorption an der Meeresoberfläche und in der Troposphäre (einschließlich der Wolkensysteme in der Intertropischen Konvergenzzone ITCZ).
- Die Untersuchung der Rolle der ITCZ beim Vertikaltransport atmosphärischer Spurenstoffe, einschließlich anthropogener Substanzen, sowie des daraus resultierenden Strahlungsantriebs.

Im INDOEX Konzeptpapier (White Paper) sind die oben genannten Themen näher beleuchtet.

Plattformen

Als Plattformen für das INDOEX Experiment sind neben ortsfesten Inselstationen sowie verschiedenen Satellitenplattformen auch eine Reihe von Flugzeugen vorgesehen. Weiter werden zwei Forschungsschiffe zum Einsatz kommen: Das amerikanische Forschungsschiff "Ronald Brown" sowie das indische Forschungsschiff "Sagar Kanya". Die verschiedenen Plattformen sind nicht redundant.

Literatur

Cess, R.D., M.H. Zhang, P. Minnis, L. Corsetti, E.G. Dutton, B.W. Forgan, D.P. Garber, W.L. Gates, J.J. Hack, E.F. Harrison, X. Jing, J.T. Kiehl, C.N. Long, J.J. Morcrette, G.L. Potter, V. Ramanathan, B. Subasilar, C.H. Whitlock, D.F. Young and Y. Zhou, Absorption of solar radiation by clouds: observation versus model, *SCIENCE*, **267**, 496-499, 1995.

Kley, D., P.J. Crutzen, H.G.J. Smit, H. Vömel, S. Oltmans, H. Grassl, V. Ramanathan. Observations of Near-Zero Ozone Levels Over the Convective Pacific: Effects on Air Chemistry. *SCIENCE*, 274, 230-233, 1996.

Kley, D., Tropospheric Chemistry and Transport, *Science*, 276, 1043-1045, 1997a.

Kley D., H. G. S. Smit, H. Vömel, H. Grassl, V. Ramanathan, P. S. Crutzen, S. F. Williams, S. Meywerk and S. Oltmans, Tropospheric Water Vapour and Ozone Cross Sections in a Zonal Plane over the Central Equatorial Pacific. *Quart. J. Roy. Met. Soc.* 123, 2009-2040, 1997b.

Ramanathan, V. and W Collins, Thermodynamic regulation of ocean warming by cirrus clouds deduced from observations of the 1987 El Nino. *Nature* **351**, 27-31, 1991.

Ramanathan, V., B. Subasilar, G.J. Zhang, W. Conant, R.D. Cess, J.T. Kiehl, H. Grassl, I. Shi, Warm pool heat budget and short wave cloud forcing: a missing physics? *SCIENCE* **267**, 499-503, 1995

Informationen über INDOEX im Internet:

About the Center for Clouds, Chemistry and Climate (C ⁴)	http://www-c4.ucsd.edu/
About INDOEX	http://www-indoex.ucsd.edu/
About INDOEX-Shipcampaign on Research Vessel "Ronald Brown"	http://www.metolab3.umd.edu/~russ/INDOEX.ship.html

Vertikalsondierungen von Ozon und Wasserdampf in der Äquatorialen Bereich über den Indischen Ozean

[Beitrag des ICG-2 zum Indian Ocean Experiment (=INDOEX)]

H. G.J. Smit und D.Kley
Institut für Chemie und Dynamik der Geosphäre (ICG-2)
Forschungszentrum Jülich
Postfach 1913, D-52425 Jülich

Ziele des Projektes

Dieses Vorhaben von Vertikalsondierungen von Ozon und Wasserdampf über dem Indischen Ozean bezieht sich auf eins der fundamentalen Ziele der Klimaforschung, nämlich der Bestimmung der Wechselwirkung zwischen warmen Oberflächenwasser, Konvektion und ihres Einflusses auf die Wasserdampfkonzentration in der oberen Troposphäre. Die Messung von Ozon dient dabei als diagnostisches Werkzeug zur Identifikation von Kumulonimbuskonvektion (Cb-Konvektion). Weiterhin ist die Messung von Vertikalprofilen des Ozons und des Wasserdampfs Voraussetzung zur Bestimmung des oxidativen Zustands der Troposphäre und damit eine notwendige Größe zur Berechnung der Oxidationsrate reduzierter Substanzen ((CH₃)₂S, SO₂, etc), deren Oxidationsprodukte die Vorläufer von Wolkenkondensationskeimen (CCN) sind. Dieser Beitrag ist eingebunden in das multinationale Indian Ocean Experiment (INDOEX), ein auf den Indischen Ozean fokussiertes Feldexperiment, dessen Zielsetzung ein vertieftes Verständnis der Wechselwirkung zwischen Ozean, Atmosphäre und Strahlungsfeld ist.

Erkenntnisstand

INDOEX baut auf den in CEPEX (Central Equatorial Pacific Experiment) gefundenen Ergebnissen und Erkenntnissen auf. Beide Feldexperimente untersuchen schwerpunktmäßig die Kopplung zwischen Ozean und Atmosphäre, einer der wichtigsten Parameter, die das Klima und seine natürliche Schwankungen bestimmen. Dabei spielt die Wechselwirkung zwischen Wolkenbildung, Aerosolen, atmosphärischer Chemie und Klima eine wichtige Rolle. So stellt der Einfluß der Wolken auf das Klima eine der größten Unsicherheiten beim Versuch dar, zukünftige Klimaänderungen vorherzusagen. Dabei ist Wasserdampf der Antriebsmotor, der mehr als 80% zum natürlichen Treibhauseffekt beiträgt. Trotz dieser überragenden Bedeutung des Wasserdampfes für den Klimaantrieb sind wichtige Einzelheiten bei den Vertikaltransportprozessen des Wasserdampfes durch Cb-Konvektion fast unbekannt. In den Tropen ist die Cb-Konvektion der Mechanismus, der über den Transport von Wasserdampf und Wolken mehr als die Hälfte zum Energiehaushalt der Hadleyzirkulation beiträgt und deshalb äußerst wichtig in Bezug auf den Klimaantrieb ist. Während CEPEX wurde 1993 erstmalig der sog. "Supertreibhauseffekt" direkt gemessen. Es handelt sich dabei um eine positive Rückkopplung zwischen der an die Meeresoberflächentemperatur (SST) gekoppelten Cb-Konvektion und dem Treibhauseffekt durch Wasserdampf, der zu einer Erhöhung der SST führen kann. CEPEX hat auch Prozesse identifiziert, die den Supertreibhauseffekt limitieren. Zum Beispiel die sog. Thermostathypothese von Ramanathan und Collins (1991): "Wenn die SST auf einen bestimmten Wert (>300K) angewachsen ist, setzt die Cb-Konvektion ein und führt zu einer sich über Tausende von km² ausbreitende Zirruschicht. Die Zirren reflektieren Teile der ankommenden Solarstrahlung und hindern die SST daran, noch weiter anzusteigen, so daß die SST nahe 300-302 K verharrt".

Ob Cb-Konvektion die tropische Atmosphäre befeuchtet oder trocknet, wird zur Zeit noch kontrovers diskutiert. Angesichts der Tatsache, daß Wasserdampf zu mehr als 80 % am Treibhauseffekt beteiligt ist, ist dieses eine Unsicherheit erster Ordnung, die durch verlässliche in-situ Messungen des atmosphärischen Wasserdampfes in Regionen mit aktiver Cb-Konvektion geklärt werden muß. Eine dabei auftretende Schwierigkeit ist, daß man zur Diagnose von Cb-Konvektion zumeist die infrarote Strahlungstemperatur von Wolken oder ihre Reflektionseigenschaften heranzieht, womit im strengen Sinn die abhängige Variable (Wasserdampf) nicht von der unabhängigen Variablen (Konvektion) getrennt ist.

In CEPEX und früheren Arbeiten haben wir (Kley et al., 1996, 1997a,b) gezeigt, daß Ozon ein verlässliches Maß für Cb-Konvektion ist. Dieses diagnostische Werkzeug beruht darauf, daß über dem tropischen Ozean die Ozonkonzentration aufgrund fehlender photochemischer Quellen außerordentlich gering ist. Die Cb-Konvektion befördert ozonarme Luftmassen in den Bereich der sich ausbreitenden Amboisse. Die Morphologie der sich ergebenden "Ozonlöcher" ist ein zuverlässiges Maß für die Intensität und die räumliche Verteilung der Cb-Konvektion. Das in-situ gemessene Ozonprofil gibt also zusätzliche, von den

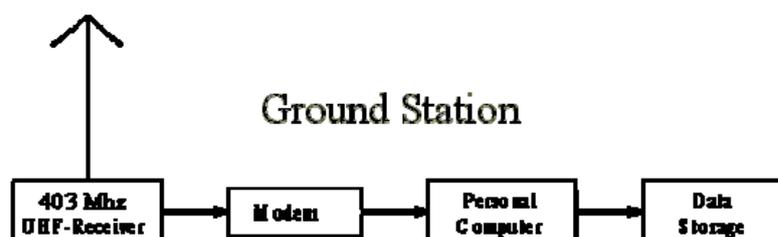
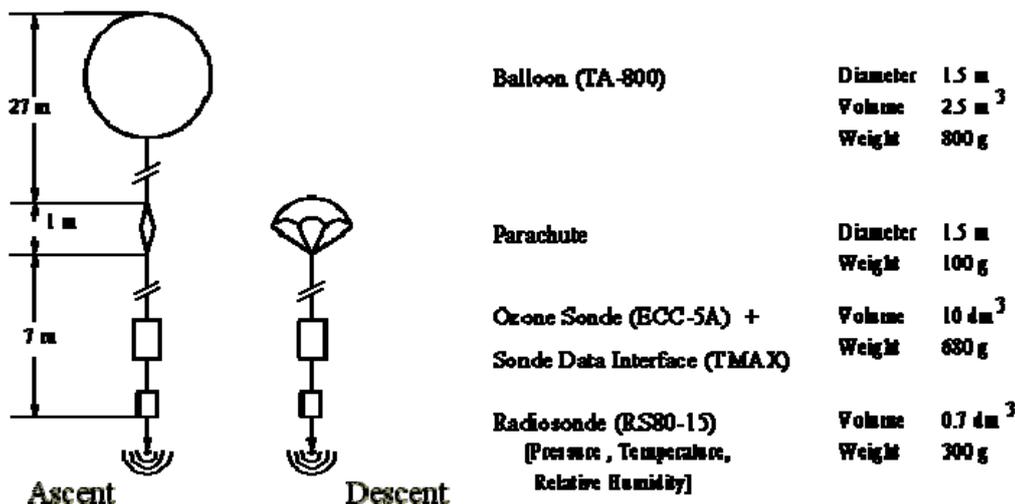
Strahlungsmessungen unabhängige, Information über Cb-Konvektion, selbst wenn aufgrund von Dissipation der Wolkenamboss schon optisch dünn geworden ist.

In CEPEX wurde von uns (Kley et al., 1996) eine wichtige Entdeckung bezüglich des Ozongehalts der Troposphäre über dem zentralen equatorialen Pazifik gemacht. In jenem Gebiet sind die bodennahen NO_x Konzentrationen außerordentlich gering, so daß photochemische Ozonbildung nicht stattfindet. Das führt dazu, daß die Luft der planetaren Grenzschicht über dem Meer (MBL) fast frei von Ozon ist. Konzentrationen von <=10 ppb wurden regelmäßig gemessen. Überraschend jedoch war die Beobachtung, daß auch die obersten Schichten der Troposphäre über Gebieten mit starker Konvektion durch äußerst geringe Ozonkonzentrationen gekennzeichnet waren. Die Erklärung dafür ist hauptsächlich darin zu suchen, daß die Cb-Konvektion Luftmassen aus der MBL direkt, ohne größere Mischung, in die oberste Troposphäre verfrachtet. Hieraus ergeben sich wichtige Implikationen für die Chemie der Troposphäre. Vergleicht man nämlich die chemischen Lebensdauern von chemisch oxidablen Substanzen unter diesen Bedingungen mit den Austauschzeiten der MBL Luft in Bezug auf den Vertikaltransport, so findet man, daß auch chemisch kurzlebige Substanzen, wie das wichtige Dimethylsulfid, (CH₃)₂S, in Gebieten mit starker Konvektion in die obere Troposphäre gelangen können, wo sie durch Oxidation Aerosole und damit CCN bilden können.

Arbeitsplan und Methodik: Ozon/Wasserdampfsondierungen während INDOEX

Die INDOEX-Meßkampagne wird über eine gesamte Dauer von 40 Tage im Februar/März 1999 stattfinden. Geplant ist daß während der gesamten Kampagnenzeit von Bord des amerikanischen Forschungsschiffes "Ronald Brown" alle 12-24 Stunden eine Kombination von kalibrierten Ozon/Feuchtesensoren mittels kleiner Ballons (2 m³) aufgelassen und so Ozon- und Feuchtedaten von bisher unerreichter Genauigkeit und Präzision liefern werden. Die Meßfahrt wird hauptsächlich im äquatorialen Bereich des Indischen Ozeans zwischen 15°S und 15°N pendeln um einen repräsentativen Vertikalquerschnitt von Ozon und Wasserdampf in dieser Region zu gewährleisten.

Hauptkomponenten einer Sonde sind Ozonsensor, Radiowettersonde, Interface zur Anbindung des Ozonsensorsignal an der Radiosonde, Ballon und Batterien. Über Telemetry wird alle 7 Sekunden ein kompletter Messdatensatz von Ozon, Druck, Temperatur und Feuchte in digitaler Kodierung zur Bodenstation an Bord des Schiffes gesendet, "on-line" verarbeitet und gespeichert. Das Gesamtgewicht des Ballongespanses beträgt etwa 1000 Gramm, wobei mit einer Aufstiegggeschwindigkeit von etwa 5 m/s eine Höhe von etwa 30-35 km erreicht wird. Die Gesamtkosten einer Ballonsonde betragen etwa 1.250,- DM.



Zur genauen Messung von Vertikalprofilen des Ozons werden in unserem Labor charakterisierte Ozonsonden eingesetzt. Das Institut für Chemie und Dynamik der Geosphäre, beherbergt die "World Calibration Center for Ozone Sondes", eine von WMO autorisierte Klimakammer, in der Ozonsonden unter flugähnlichen Bedingungen getestet und kalibriert werden können (Smit et al., 1994). Ebenfalls werden die von uns verwendete Feuchtesensoren, Humicap-H Sensoren der RS80-Radiosonde (Vaisala, Finland), in unserer Klimakammer gegen ein Referenzinstrument kalibriert.

Postkampagne Arbeiten (April 1999-Dezember 1999) werden in erste Linie die Aufarbeitung und Validierung der INDOEX-Sondierungsdaten unter Verwendung der Ergebnisse aus den Sensorcharakterisierung in der Simulationskammer umfassen. In Zusammenhang mit der Sondierungen die Bereitstellung der großräumige meteorologischen Synoptik (ECMWF-Analysedaten) und IR-Fernerkundungsdaten (SST, Cloud Coverage, Cloud Top Temperature, usw.). Analyse und erste Interpretation der Ergebnisse. Am Ende von 1999 sollen die Ergebnisse in die INDOEX-Datenbank eingebracht werden.

Als Vorstudium zu INDOEX haben wir im Zusammenarbeit mit dem indischen National Physics Laboratory (NPL) in März 1998 insgesamt 15 Ozon/Wasserdampf-Sondierungen vom Bord des indischen Forschungsschiffes "Sagar Kanya" über dem Indischen Ozean durchgeführt. Die Sonden wurden von uns bereit gestellt aber von indischen Kollegen geflogen. Die daraus anfallende Daten werden zur Zeit von uns ausgewertet und analysiert. Diese Erkenntnisse dienen dann zur weiteren Planung des INDOEX-Sondierungsprogram.

Bedarfsbegründung

Das Ozon/Wasserdampfsondierungsprogramm soll einen wichtigen Beitrag liefern zur besseres Verständnis der Wechselwirkung zwischen warmen Oberflächenwasser, Cb-Konvektion, oxidativen Zustand und der Wasserdampfverteilung in der oberen Troposphäre. Bis jetzt gibt es keine unabhängige Größe zur Identifikation von Cb-Konvektion und keine zuverlässigen Messungen von Wasserdampf und Ozon in der oberen Troposphäre über den indischen Ozean. Beitrag zur Bestimmung des oxidativen Zustands der Troposphäre im Hinblick auf Bildung von CNN durch Oxidation von reduzierten Substanzen ((CH₃)₂S, SO₂, etc).

Seit CEPEX (1993) besteht eine enge wissenschaftliche Zusammenarbeit des ICG-2 mit dem amerikanischen Center for Clouds, Chemistry and Climate (C⁴) des Scripps Institution of Oceanography, San Diego (Direktor: Prof. V. Ramanathan) mit dem Schwerpunkt der Erforschung der Dynamik und Wechselwirkung von Wasserdampf (Wolken) und atmosphärischer Chemie (Ozon) im Klimasystem. Teil dieser Zusammenarbeit ist das von uns beabsichtigte Sondierungsprogramm wobei INDOEX ein internationales und multidisziplinäres Projekt wobei international anerkannte Fachleute aus der Meteorologie, atmosphären Chemie/Physik und Ozeanographie zusammenarbeiten werden.

Literatur

Kley, D., P.J. Crutzen, H.G.J. Smit, H. Vömel, S. Oltmans, H. Grassl, V. Ramanathan. Observations of Near-Zero Ozone Levels Over the Convective Pacific: Effects on Air Chemistry. *SCIENCE*, 274, 230-233, 1996.

Kley, D., Tropospheric Chemistry and Transport, *Science*, 276, 1043-1045, 1997a.

Kley D., H. G. S. Smit, H. Vömel, H. Grassl, V. Ramanathan, P. S. Crutzen, S. F. Williams, S. Meywerk and S. Oltmans,. Tropospheric Water Vapour and Ozone Cross Sections in a Zonal Plane over the Central Equatorial Pacific. *Quart. J. Roy. Met. Soc.* 123, 2009-2040, 1997b.

Ramanathan, V. and W Collins, Thermodynamic regulation of ocean warming by cirrus clouds deduced from observations of the 1987 El Nino. *Nature* **351**, 27-31, 1991.

Smit, H.G.J., Sträter, W., Kley, D., Proffitt, M.H., The evaluation of ECC-ozone sondes under quasi flight conditions in the Environmental simulation chamber at Jülich, A contribution to subproject TOR , In: Transport and Transformation of Pollutants in the Troposphere, Proceedings of EUROTRAC Symposium '94, Garmisch-Partenkirchen, 11-15 April 1994 , P. Borrell, P.M. Borrell and W. Seiler Editors, SPB Academic Publishing, The Hague, The Netherland, pp. 349-353, 1994.

Informationen über INDOEX im Internet:

About the Center for Clouds, Chemistry and Climate (C ⁴)	http://www-c4.ucsd.edu/
About INDOEX	http://www-indoex.ucsd.edu/
About INDOEX-Shipcampaign on Research Vessel "Ronald Brown"	http://www.metolab3.umd.edu/~russ/INDOEX.ship.html

POSTER

Tropospheric Ozone as a Tracer for Large Scale Meridional Transport and Deep Convection

Dieter Kley and Herman G. J. Smit

Institut für Chemie der Belasteten Atmosphäre (ICG-2)
Forschungszentrum Jülich GmbH
D-52425 Jülich
Germany

Cumulonimbus Convection and Vertical Transport

Deep convection rapidly lifts surface air to the upper troposphere (up to 11-13 km without violation of the first law of thermodynamics). The cumulonimbus (Cb) transport has implications for:

- Upper tropospheric photochemistry
- Vertical distribution and redistribution of water vapor and clouds
- Radiation budget

Simultaneous ozone/water vapor soundings over tropical oceans (Atlantic, Pacific) revealed:

- very low ozone concentrations in the MBL and in the upper troposphere of the Intertropical Convergence Zone (ITCZ).
- slightly higher ozone concentrations in the middle troposphere.
- low ozone mixing ratios coincided with high relative humidity.

Ozone over Tropical Oceans

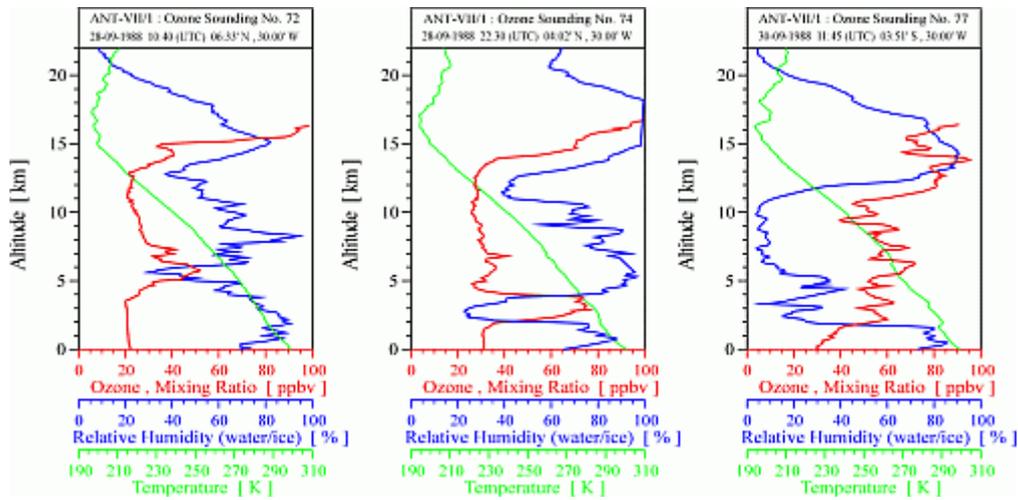
Low ozone concentration in the marine boundary layer (MBL), because of

- high water vapor concentration
- high UV flux
- low NO_x mixing ratio (<10pptv)¹

Large ozone lifetime (>100days) and little ozone production in the free troposphere, because of

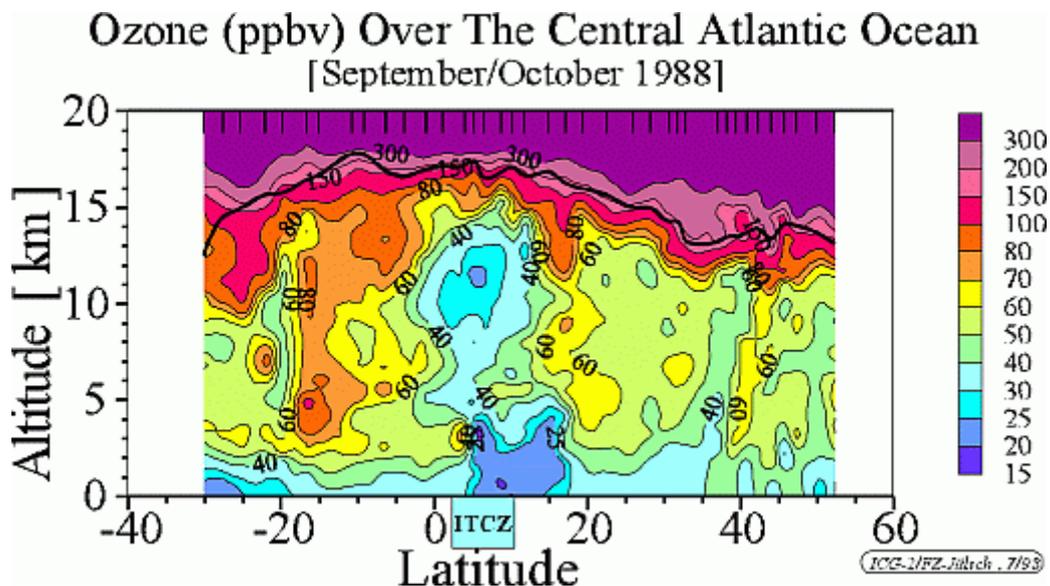
- low water vapor concentration
- relatively low NO_x concentration.

¹Liu, S.C., M. McFarland, D. Kley, O. Zafiriou and B. Huebert. Tropospheric NO_x and O₃ Budgets in the Equatorial Pacific. J. Geophys. Res. 88, 1360-1368 (1983). See also Schultz et al., J. Geophys. Res. (in press)



Examples of ozone/humidity soundings in the ITCZ region: Layers with enhanced ozone mixing ratios in the middle troposphere coincide with layers of low relative humidity suggesting inclined, downward sloping, transport of regions with higher ozone mixing ratios.

Ozone Cross Section

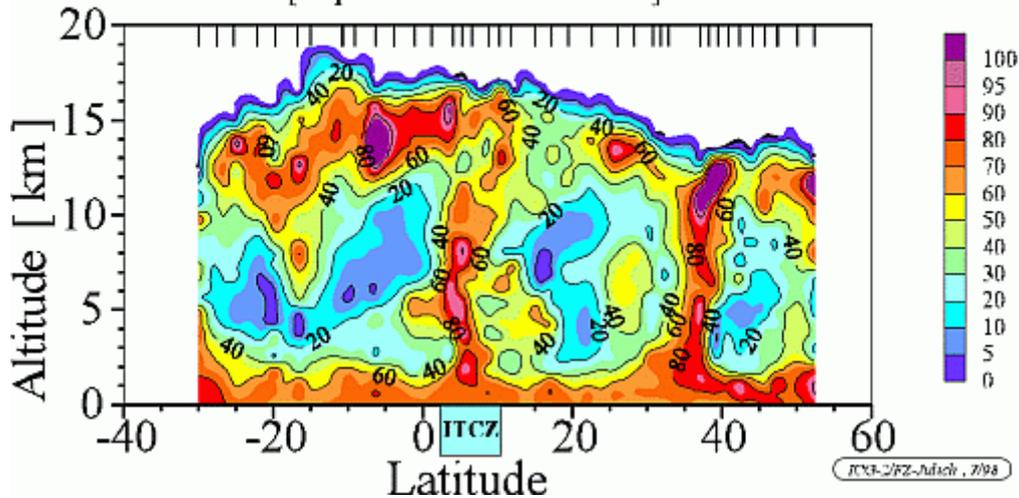


Meridional cross sections of ozone from shipboard soundings over the Central Atlantic mainly at 30°W. Linear interpolation of non-equidistant soundings (marks indicate latitudes of soundings). The black line in the upper troposphere indicates tropopause.

- Deep convection lifts ozone-deficient air. In the center of the deep convective region, upper tropospheric ozone mixing ratios are as low as the surface values.
- Downward transport occurs outside (north and south) of the ITCZ.
- Higher ozone value in the middle troposphere of the deep convective region indicate convergence and entrainment of air with an origin from outside of convective regions.

Soundings in the ITCZ region

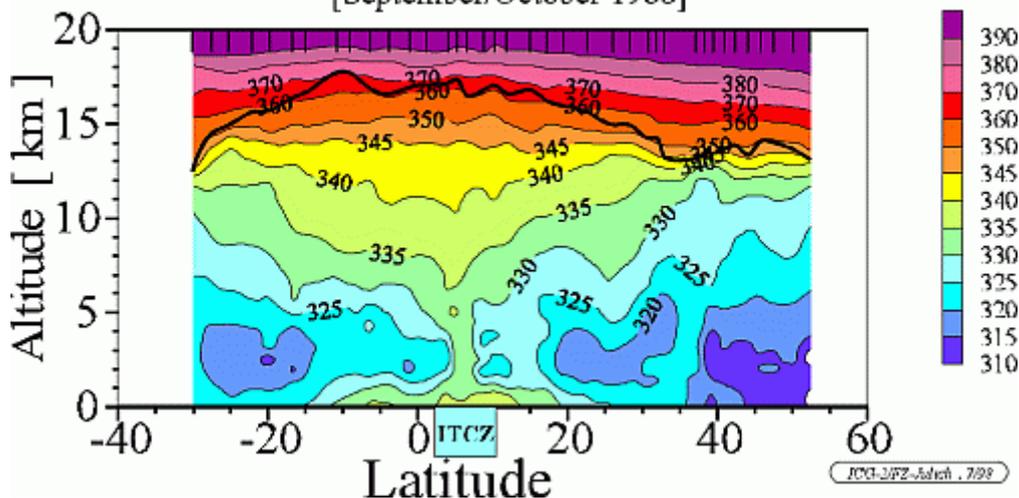
Rel. Humidity (Ice, %) Over The Central Atlantic Ocean
[September/October 1988]



- The troposphere above the ITCZ region is wet.
- To the north and south, the troposphere is dry.
- Complementarity of the ozone and humidity cross section which implies that ozone can be used as an "independent variable" for deep convection.
- Ozone as a tracer to draw conclusions on water vapor as a "dependent variable" of Cb convection.

Moist Static Energy Cross Section

Moist Static Energy (KJ/kg) Over The Central Atlantic Ocean
[September/October 1988]



- Cross section of moist static energy, Q (sum of potential energy, dry and latent heat content).
- Surface values of Q are high in the ITCZ region (335-340 kJ/kg).
- Minimum of Q (330-335 kJ/kg) in the middle troposphere over the ITCZ. Deep convection occurs in singular events which penetrate the minimum of Q in narrow "tubes" of constant energy.

Conclusions

- Transported air masses in the MBL lose ozone on their way to the ITCZ, where the ozone deficient air is lifted by Cb-convection.
- Active or recent deep convection marks its appearance in the upper tropical troposphere by very low ozone mixing ratio.

The use of ozone as diagnostic tool allows to conclude that:

- Air masses of upper tropospheric subtropical origin are transported to the tropics
- Large scale convergence takes place near 5 km (700 hPa, $Q \approx 330$ kJ/kg), which entrains dry air into the convection.
- The cross section of moist static energy with its omnipresent minimum of ≈ 330 kJ/kg in the free troposphere above the ITCZ may be the result of mixing convective air ($Q \approx 345$ kJ/kg) with air of lower Q of nontropical origin.

Outlook

- One of the striking and largely unexplained characteristics of the low latitude troposphere is the mid-troposphere minimum in the moist static energy, Q .
- This minimum creates an apparently stable Q gradient within the middle and upper troposphere.
- Dry, ozone rich, subtropical air from the upper troposphere is advected to the tropics where it is entrained into convection.
- The mixing of dry with convective, high humidity, air lowers the thermodynamic moist static energy, thereby reducing the neutral buoyancy levels.

Key Question:

- Can the minimum of Q in the tropics be consistently explained by a circulation which, similar to the return flow of the Hadley cell, transports subtropical air to the middle troposphere (near 700 hPa) of the inner tropics?
- If so, could such a circulation exert a controlling influence on the extensity and intensity of deep convection?