

IAGOS: Verkehrsflugzeuge für die Klimaforschung „Luftbilder“ der globalen Atmosphäre

ANDREAS PETZOLD | SUSANNE ROHS | CHRISTOPH GERBIG | ANDREAS ZAHN



Einbau einer IAGOS-Einlassplatte in ein Flugzeug der Deutschen Lufthansa (Foto: mit freundl. Genehmigung der Deutschen Lufthansa).

Das Erkennen langfristiger Veränderungen in der freien Atmosphäre stellt eine der großen Herausforderungen in der Beobachtung der Atmosphäre dar. IAGOS (In-service Aircraft for a Global Observing System) kombiniert zur Lösung dieser Aufgabe Messinstrumente wissenschaftlicher Einrichtungen mit Flugzeugen der Zivilluftfahrt. Wichtige Daten über das Wetter, die Luftqualität und den Treibhausgasgehalt werden täglich und auf langen Strecken durch kompakte Messgeräte an Bord von zehn Passagierflugzeugen und zusätzlich von einem fliegenden Labor gesammelt. Das IAGOS-Datenzentrum bietet allen Forschenden weltweit freien Zugang zu diesen Daten und Datenprodukten.

This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution License, which permits use, distribution and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Über unseren Köpfen treffen die beiden untersten Stockwerke der Atmosphäre zusammen: Die unmittelbar von uns Menschen beeinflusste Troposphäre und die darüber liegende Stratosphäre, mit ihrer für das Leben auf der Erde wichtigen Ozonschicht. Die Übergangsschicht – wir bezeichnen sie als Tropopause – reagiert besonders empfindlich auf den menschengemachten Treibhauseffekt. Treibhausgase und deren Veränderungen haben dort einen ungleich höheren Einfluss auf das Klima als in bodennahen Luftschichten. Daher hat die regelmäßige Beobachtung von Veränderungen innerhalb der Tropopause eine besondere Bedeutung für unser Verständnis des Klimawandels.

Um den Klimawandel und seine Auswirkungen auf die Luftqualität auf breiter Basis zu verstehen und vorherzusagen, sind genaue Kenntnisse und langfristige Erhebungen der sogenannten essenziellen Klimavariablen (Essential Climate Variables, ECV, siehe „Essenzielle Klimavariablen der Atmosphäre“ auf S. 3) auf vielen Skalen und insbesondere für die unteren beiden Stockwerke der Atmosphäre notwendig. Essenzielle Klimavariablen wurden im Rahmen des Global Climate Observing System GCOS [1] (siehe „Internet“ auf S. 9) der Weltorganisation für Meteorologie (WMO) als „kritische Variablen für die Charakterisierung des Klimasystems und seiner Veränderungen“ identifiziert [2]. ECVs der Atmosphäre umfassen atmosphärische Zustandsparameter wie Temperatur, Wasserdampf (H_2O) und Wolken- und Aerosoleigenschaften sowie die Konzentrationen wichtiger Treibhausgase wie Kohlendioxid (CO_2) und Methan (CH_4) und chemisch aktiver Spurengase wie Ozon (O_3) sowie seiner Vorläufersubstanzen Kohlenmonoxid (CO) und Stickoxide (NO_x).

Langfristige Messungen dieser zentralen Variablen liefern die empirische Basis, von der ausgehend die in der Atmosphäre ablaufenden Prozesse und damit die Entwicklung des Klimas besser verstanden und vorhergesagt werden können. Darüber hinaus ermöglichen lange Messreihen von ECVs die Überprüfung der Wirksamkeit von Klimaschutz- und Anpassungsmaßnahmen, eine verbesserte Risikobewertung und die mögliche Zuordnung von „Klimaereignissen“ zu ihren Ursachen. ECV-Änderungen sind zudem von hoher Bedeutung,

um wichtige Rückkopplungsmechanismen im Klimasystem zu verstehen, zu bewerten und ihre Darstellung in Wetter- und Klimamodellen zu verbessern, um damit Unsicherheiten in der Vorhersage von Veränderungen zu reduzieren [3].

Seit mehreren Jahrzehnten werden unter der Koordination der WMO Messnetze für klimarelevante Spurenstoffe von der Erdoberfläche aus aufgebaut, vor allem über den kontinentalen Gebieten der nördlichen Hemisphäre [4]. Seit den 1980er-Jahren wurden zudem zunehmend Satelliten entwickelt, um eine globale Sicht auf einige wenige Variablen zu ermöglichen, allerdings meist in der Form von über die gesamte atmosphärische Säule integrierten Messgrößen. Ergänzende Beobachtungen über den Ozeanen oder über abgelegenen Gebieten sowie mit detaillierteren vertikalen Informationen kann man jedoch nach wie vor nur durch Forschungsflugzeuge oder Forschungsballons während spezieller, begrenzter Feldkampagnen oder mit hochspezialisierten Fernerkundungsinstrumenten oder Radiosonden über wenigen Bodenstationen gewinnen.

Verkehrsflugzeuge als Träger von Sensoren

Die Idee, Verkehrsflugzeuge zur regelmäßigen Untersuchung der Tropopause einzusetzen, kam Anfang der 1990er-Jahre auf, um damit Beobachtungen in einem Umfang und in einer Anzahl zu erhalten, die mit Forschungsflugzeugen nicht möglich sind, und in Regionen, in denen andere Messmethoden wie etwa Satelliten technische Grenzen haben. Die jetzige europäische Forschungsinfrastruktur IAGOS (siehe „Internet“) entwickelte sich aus dieser Idee, um langfristig routinemäßige *In-situ*-Beobachtungsdaten der Atmosphäre mit großer räumlicher Abdeckung [5, 6] zu gewinnen. Da die kommerzielle Luftfahrt genau in diesem wichtigen

ESSENZIELLE KLIMAVARIABLEN DER ATMOSPÄRE

Essenzielle Klimavariablen für die atmosphärische Zusammensetzung sind definiert als eine physikalische oder chemische Variable oder eine Gruppe miteinander verbundener Variablen, die zentral zur Charakterisierung der atmosphärischen Zusammensetzung beitragen.

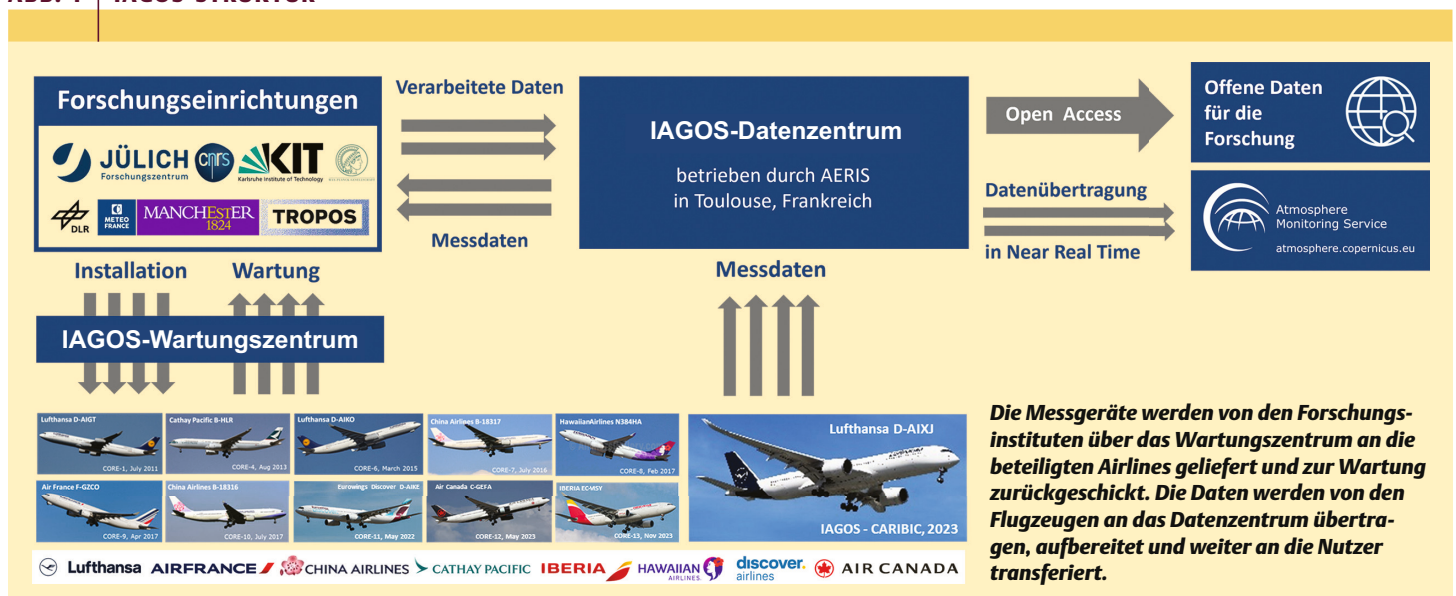
Zu dieser Gruppe von Variablen gehören das langlebige Treibhausgas CO₂, aber auch viele der kurzlebigen klimaktiven Luftinhaltsstoffe wie Ozon, Methan und Aerosolpartikel sowie meteorologische Parameter wie Lufttemperatur und Luftfeuchtigkeit (Wasserdampf-Volumenmischungsverhältnis, spezifische Feuchtigkeit, relative Feuchtigkeit).

Die für die Klimaüberwachung aufzuzeichnenden Messgrößen werden von der Weltorganisation für Meteorologie (WMO) im Observing Systems Capability Analysis and Review Tool (WMO-OSCAR) festgelegt.

und sehr schwer zugänglichen Höhenbereich von 9 bis 13 km operiert, sind mit kleinen, kompakten und leichten wissenschaftlichen Instrumenten zur Messung der Luftzusammensetzung ausgestattete Verkehrsflugzeuge sehr kostengünstige Träger für solche Sensoren. Entsprechend liegt der wissenschaftliche Schwerpunkt von IAGOS auf der Langzeitbeobachtung der Luftzusammensetzung und der atmosphärischen Prozesse in der oberen Troposphäre bis zur untersten Stratosphäre und insbesondere auf der Erfassung von Veränderungen in der Tropopause [7].

Die Nutzung von Verkehrsflugzeugen für die Atmosphärenforschung ermöglicht die effiziente Erhebung präziser *In-situ*-Daten mit hoher zeitlicher und räumlicher Auflösung bei vergleichsweise geringen Betriebskosten für die Sensoren und die Infrastruktur als Ganzes. Laut einer kürzlich veröffentlichten

ABB. 1 | IAGOS-STRUKTUR



Kosten-Nutzen-Analyse für Erdbeobachtungssysteme [8] hat die Verwendung von Flugzeugen im Betrieb für atmosphärische Beobachtungen eines der besten Kosten-Nutzen-Verhältnisse aller Beobachtungssysteme. Das seit den 1960er-Jahren bestehende WMO-Beobachtungssystem AMDAR (Aircraft Meteorological Data Relay), dessen Temperatur- und Winddaten die tägliche Wettervorhersage verbessern, ist ein exzellentes Beispiel dafür. Dieser Ansatz wird durch IAGOS erweitert und ergänzt.

IAGOS-Daten ergänzen jene Datensätze, die während fokussierter Messkampagnen mit Forschungsflugzeugen erhoben werden. Im Gegensatz zu Forschungsflugzeugen kann in Passagierflugzeugen jedoch aufgrund von Platz-, Gewichts- und Betriebsbeschränkungen nur eine begrenzte Anzahl von unterschiedlichen Spurenbestandteilen gemessen werden. Beispielsweise können keine detaillierten Wolkenbeobachtungen mit komplexeren Instrumenten durchgeführt werden, die in Unterflügelcontainern untergebracht sind. Doch allein aufgrund der hohen Flugfrequenz ermöglichen die Daten eine gute Beschreibung der Luftzusammensetzung für das von Passagierflugzeugen frequentierte Höhenband und der Flugkorridore. Eine gleichwertige Probenahme können Forschungsflugzeuge nicht erreichen.

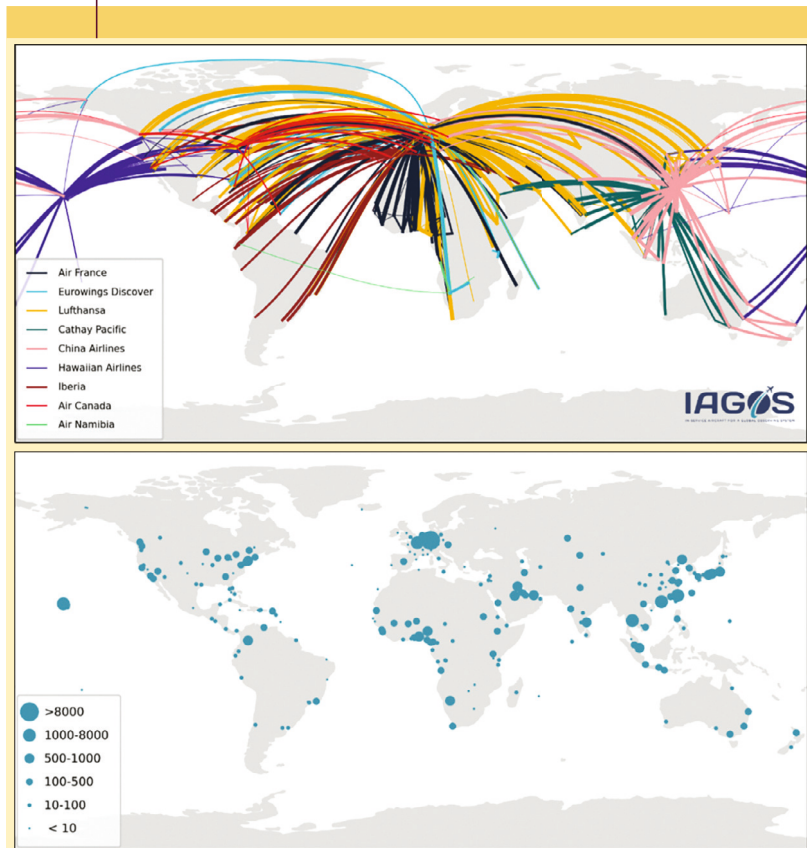
Die IAGOS-Infrastruktur

IAGOS stützt sich auf die wissenschaftlichen und technologischen Erfahrungen, die im Rahmen der Forschungsprojekte MOZAIC (Messung von Ozon und Wasserdampf in Airbus-Flugzeugen [9]) und CARIBIC (Civil Aircraft for the Regular Investigation of the Atmosphere Based on an Instrument Container [10]) gewonnen werden konnten. IAGOS kombiniert das Fachwissen und die Geräte wissenschaftlicher Einrichtungen mit den Flugzeugen der zivilen Luftfahrt, um wichtige Daten über den Klimawandel und die Luftqualität auf globaler Ebene zu liefern. Die IAGOS-Infrastruktur baut auf zwei sich ergänzenden Systemen auf: IAGOS-CORE auf der Grundlage von MOZAIC, das tagtäglich eine globale Erfassung der wichtigsten Atmosphärenvariablen durch derzeit zehn weltweit operierende Verkehrsflugzeuge mit kompakten Messgeräten an Bord ermöglicht, und IAGOS-CARIBIC, das detailliertere und komplexere Messungen mit einer geringeren geografischen und zeitlichen Abdeckung mit Hilfe eines fliegenden Labors in Form eines mit Messgeräten bestückten Frachtcontainers durchführt.

Vereinfacht dargestellt, liefert IAGOS-CORE die statistische Grundlage für Langzeituntersuchungen zur Veränderung der Atmosphäre sowie zu saisonalen Verteilungsmustern ausgewählter atmosphärischer Klimavariablen, während IAGOS-CARIBIC mit seinen detaillierten Messungen von über 100 chemischen Spezies und Partikeleigenschaften die Basis für gezielte Prozessstudien bereitstellt. In ihrer Idealkombination erlauben die beiden IAGOS-Komponenten Untersuchungen zu atmosphärenchemischen Prozessen anhand von CARIBIC-Daten und die Einordnung der CARIBIC-Beobachtungen in eine größere statistische Gesamtheit durch die gleichzeitig erfolgenden CORE-Messungen. Mit dieser Kombination verfügt IAGOS über ein weltweites Alleinstellungsmerkmal.

Die gesamte Struktur von IAGOS mit seinen Hauptkomponenten, den Partnerinstitutionen in Deutschland, Frankreich und Großbritannien und den beteiligten Luftverkehrsgesellschaften ist in Abbildung 1 dargestellt. Die Kernstücke der Infrastruktur sind Forschungseinrichtungen, welche die Messgeräte bereitstellen, warten, reparieren und kalibrieren, das *IAGOS-Wartungszentrum*, das von den Forschungseinrichtungen die kalibrierten Messgeräte zur Installation an die Fluggesellschaften weiterleitet und auf dem Rückweg die ausgebauten Messgeräte von den Fluggesellschaften zu den Forschungseinrichtungen zurückgibt, und das *IAGOS-Datenzentrum*. Letzteres verwaltet den gesamten Fluss von Daten und Metadaten zwischen den Forschungseinrichtungen, den Flugzeugen und den wissenschaftlichen Datennutzern. Die Zwischenschaltung eines Wartungszentrums ist aus juristischen Gründen notwendig, da Messgeräte oder auch andere elektronische Instrumente, die auf Verkehrsflugzeugen eingebaut werden,

ABB. 2 | FLUGROUTEN UND ZIELFLUGHÄFEN



Die Übersicht über die Flugrouten seit 1.11.2012 (oben) und Zielflughäfen seit 8.7. 2011 (unten) und die aktuellen Positionen der Flugzeuge sind online zu finden (siehe IAGOS in „Internet“). Die Karte gibt den Stand zum Anfang November 2024 wieder.

einer sehr strengen Aufsicht durch die EASA (European Union Aviation Safety Agency) unterliegen und nur von Firmen an die Fluglinien weitergegeben werden dürfen, die über die entsprechenden Zertifikate der EASA verfügen. Im Falle von IAGOS ist es die enviscope GmbH in Frankfurt/Main, die diese Aufgabe erfüllt.

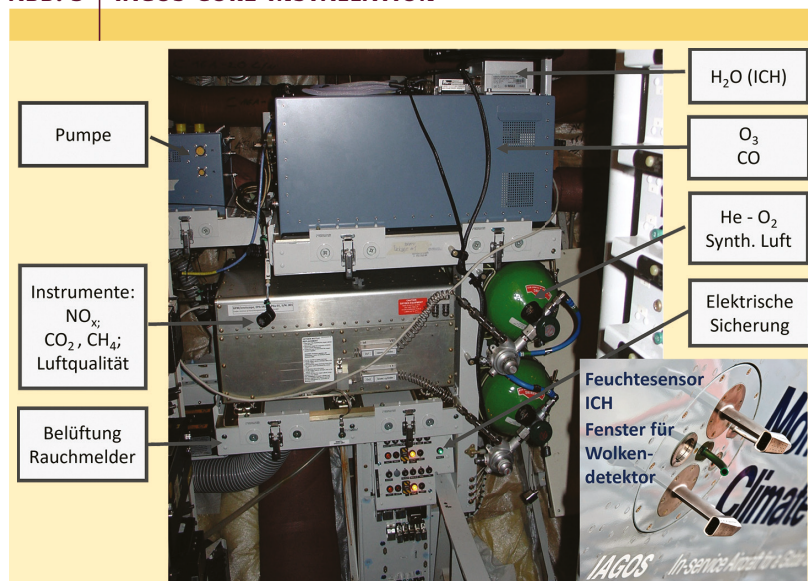
Seit Beginn der Messungen in MOZAIC und CARIBIC in den 1990er-Jahren haben die mit Messgeräten bestückten Verkehrsflugzeuge der IAGOS-Flotte mehr als 400 Millionen Kilometer zurückgelegt und sind dabei fast 9500-mal um die Erde geflogen. Die dabei erhobenen Daten wurden erfasst, ohne dass eine zusätzliche Tonne CO₂ dafür emittiert wurde, da die Messungen ja während der regulären Flüge stattfinden. Die Flugrouten der einzelnen Fluggesellschaften sowie die im Verlauf der Messungen besuchten Zielflughäfen sind in Abbildung 2 dargestellt.

Die IAGOS-CORE-Instrumente

Für die täglich globale Erfassung der wichtigsten Atmosphärenvariablen durch die derzeit zehn mit IAGOS-Instrumenten ausgerüsteten Verkehrsflugzeuge wurde ein kompakter Messaufbau realisiert, der an Bord von Flugzeugen der Typen Airbus A340 und Airbus A330 installiert werden kann (Abbildung 3). Der gesamte Aufbau wiegt 160 kg und ist unmittelbar unter dem Cockpit in der sogenannten Avionics Bay untergebracht. Eine umfassende Beschreibung der Messgeräte findet sich auf der IAGOS-Webseite und im Übersichtartikel [6].

Tabelle 1 fasst die wichtigsten Kenngrößen der Messgeräte zusammen. Ein Grundsatz bei der Auswahl der Messgeräte war, dass es sich um robuste, wartungsarme

ABB. 3 | IAGOS-CORE-INSTALLATION



IAGOS-CORE-Messgeräte auf dem Airbus A340-300 der Deutschen Lufthansa mit dem Kennzeichen D-AIGT [6].

und gut eingeführte Methoden handeln muss, da Veränderungen im Messaufbau durch die komplexen luftfahrtrechtlichen Zulassungsverfahren sehr zeitaufwendig und teuer sind. Zudem müssen die Geräte mindestens drei Monate ohne Wartung in Betrieb sein können. Bei Wasserdampf/relativer Feuchte wurde mit dem sogenannten Vaisala Humicap Sensor für das IAGOS Capacitive Hygrometer (ICH) ein Instrument gewählt, das auch in den Wetterballon-Radiosonden der Wetterdienste zum Einsatz kommt und sehr wartungsarm ist. Für die Erfassung von Treibhausgasen im optionalen „Package 2“

TAB. 1 | KENNDATEN DER IAGOS-CORE-INSTRUMENTE

	Parameter	Methode	Auflösung	Genauigkeit	Institution	
Package 1 (alle Flugzeuge)		O ₃	UV-Absorption	4 s	± 2 ppbv	CNRS, FR
		CO	IR-Absorption	30 s	± 5 ppbv	CNRS, FR
		H ₂ O / RH	Kapazitiver Feuchtesensor ICH	5-300 s	± 5 % RH	FZJ, DE
		Temperatur	Pt100	4 s		FZJ, DE
		Wolken	Wolkenrückstreusonde BCP	4 s		Univ. Manchester, UK
Package 2 (eine Option pro Flugzeug)	P2 b	NO _x	Chemilumineszenz mit UV-NO ₂ -Konverter	4 s	± 50 pptv	FZJ, DE
	P2 c	Aerosol	Kondensationspartikelzähler (0,01 - 3µm) Optischer Partikelzähler (0,25 - 3µm)	4 s	± 10 cm ⁻³ ± 5 cm ⁻³	FZJ, DE zurzeit für IAGOS-CARIBIC
	P2 d	CO ₂ CH ₄ H ₂ O CO	Cavity-Ring-Down-Spektroskopie	4 s	± 0,1 ppmv ± 2 ppbv ± 6-15 ppmv ± 10 ppbv	MPI-BGC, DE
	P2 e	Aerosol	Kondensationspartikelzähler (0,01 - 3µm) Optischer Partikelzähler (0,125 - 3µm) Lichtextinktionsmonitor (450 nm, 670 nm)	4 s	± 10 cm ⁻³ ± 5 cm ⁻³	FZJ, DE
		NO ₂	NO ₂ -Monitor (450 nm)			

(Tabelle 1) wurde die bewährte Cavity-Ring-Down-Spektroskopie gewählt, weil sie empfindlich genug zur Messung von Spurengasen ist. Sie kommt auch bei der bereits in dieser Zeitschrift vorgestellten Infrastruktur des ICOS-Bodennetzwerks für die Messung von CO_2 und CH_4 zum Einsatz [11]. Die Auswahl der Technologien folgt dabei generell dem Grundsatz, dass die Messergebnisse aus den unterschiedlichen Messnetzen und -infrastrukturen leicht kombinierbar sein müssen, um daraus globale Datensätze für die wissenschaftliche Analyse bereitstellen zu können.

Die Messinstrumente werden je nach Erfordernissen und Wartungsbedarf alle drei bis zwölf Monate auf den Flugzeugen durch neu kalibrierte Geräte ausgetauscht. Die ausgebauten Geräte werden anschließend über das Wartungszentrum an die Forschungsinstitute geschickt und dort einer Bestandsaufnahme sowie einer sogenannten *Post-Flight*-Kalibrierung unterzogen. Nach erfolgter Wartung und Reparatur werden die Geräte vor dem nächsten Einsatz erneut kalibriert (*Pre-Flight*-Kalibrierung) und dann an das Wartungszentrum zur weiteren Versendung verschickt.

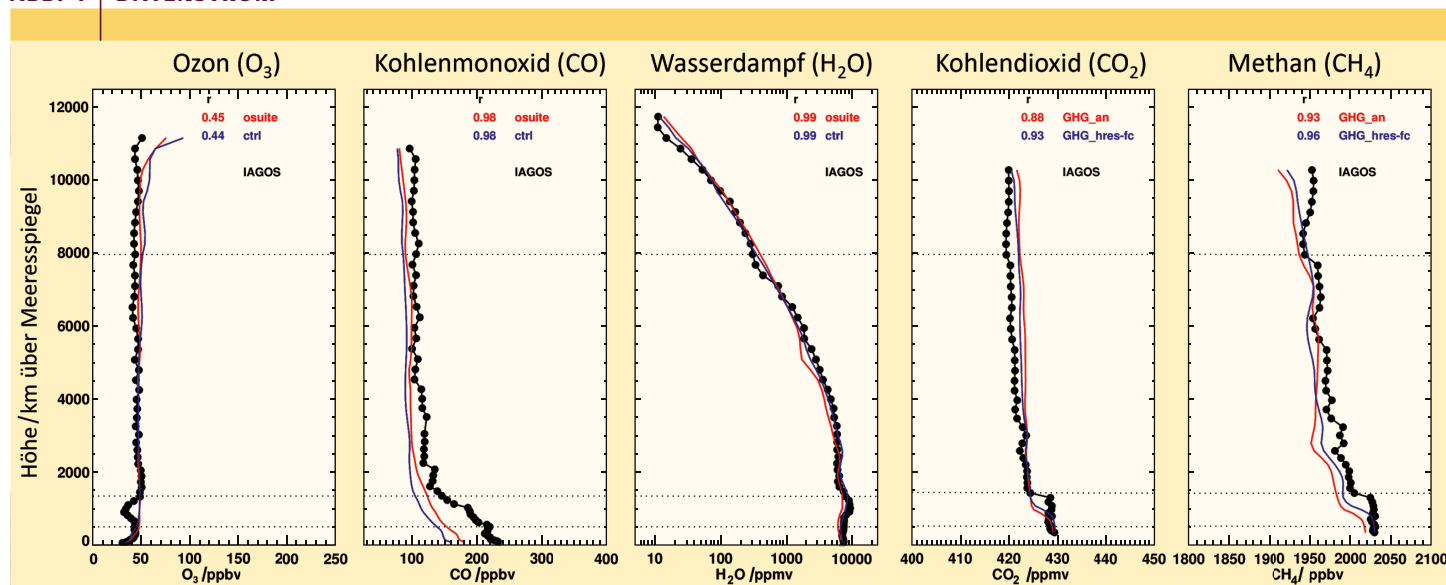
Die Verarbeitung der Messdaten erfolgt in mehreren Schritten; die in Form von Spannungen oder Zählraten übermittelten Rohdaten werden als Level-0-Daten bezeichnet und abgespeichert. Zusätzlich werden die Daten des Flugzeuges zu Position, Druck, Geschwindigkeit, Zeit usw. kombiniert und in einem automatisierten Verfahren unter Verwendung der *Pre-Flight*-Kalibrierungen in physikalische Messgrößen umgewandelt und als sogenannte

Near-Real-Time-Daten (NRT, annähernd Echtzeit, wenige Stunden bis maximal drei Tage nach der Messung) an die Nutzer weitergegeben und in der Datenbank abgespeichert.

Nach einer ersten Prüfung durch die verantwortlichen Forschenden werden die kombinierten Daten dann als Level-1-Daten qualifiziert und gespeichert. NRT- und Level-1-Daten sind nicht für wissenschaftliche Analysen geeignet, da die abschließende Bewertung fehlt, können aber für Zwecke mit geringeren Anforderungen an die Genauigkeit herangezogen werden, dazu ein Beispiel im folgenden Absatz. Nach der Rückkehr der Messgeräte zu den Forschungseinrichtungen und dem Vorliegen der *Post-Flight*-Kalibrierung werden die Messdaten der Einsatzperiode des Messgeräts abschließend ausgewertet, geprüft und als vollständig qualitätskontrollierte Datensätze nach einer umfassenden Prüfung durch die verantwortlichen Forschenden über das Datenportal zugänglich gemacht.

Wie erwähnt wird ein Teil der Messdaten zusätzlich in NRT für die Wettervorhersage und die Vorhersage der Luftqualität über automatisierte Kanäle bereitgestellt, an den Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS, siehe „Internet“) geschickt und dort für die kontinuierliche Validierung der CAMS-Atmosphärenmodelle im Vorhersagemodus (Abbildung 4) und im Analysemodus genutzt. IAGOS zählt hier zu einer der wichtigen Infrastrukturen für die kontinuierliche Bereitstellung hochwertiger Messdaten für die CAMS-Modelle [12]. Ein Beispiel eines NRT-Datensatzes ist in Abbildung 4 gezeigt. Die große Bedeutung dieser in nahezu Echtzeit

ABB. 4 | DATENSTROM



Die von IAGOS-CORE-Flugzeugen in nahezu Echtzeit an den Copernicus Atmosphere Monitoring Service übertragenen Daten werden zur regelmäßigen Evaluierung der Copernicus-Modelle herangezogen (Quelle: http://www.iagos-data.fr/cams/nrt_profiles.php). Die hier gezeigten Landprofile sind vom Airbus A330-300 D-AIKO am 17. März 2022 in Frankfurt am Main aufgezeichnet worden. Blaue Kurven: ohne Datenassimilation, rote: mit Datenassimilation; ppb(m)v: parts per billion (million) by volume. Die Datenassimilation dient beim Start einer numerischen Wettervorhersage dazu, den gemessenen Istzustand der Erdatmosphäre dem Modell als Anfangswert vorzugeben.

bereitgestellten Vertikalprofile für die Validierung der verschiedenen CAMS-Modelle erschließt sich unmittelbar aus dem Umstand, dass es für Ozon, Kohlenmonoxid, Kohlendioxid und Methan keine anderen Beobachtungsinfrastrukturen gibt, die solche *in-situ* gemessenen Verteilungen dieser Spurenstoffe bereitstellen können. Wasserdampfprofile werden zwar durch regelmäßige Aufstiege der Radiosonden des Deutschen Wetterdienstes gemessen, aber die Verteilung des Wasserdampfes in der Tropopause kann so nur bedingt erfasst werden.

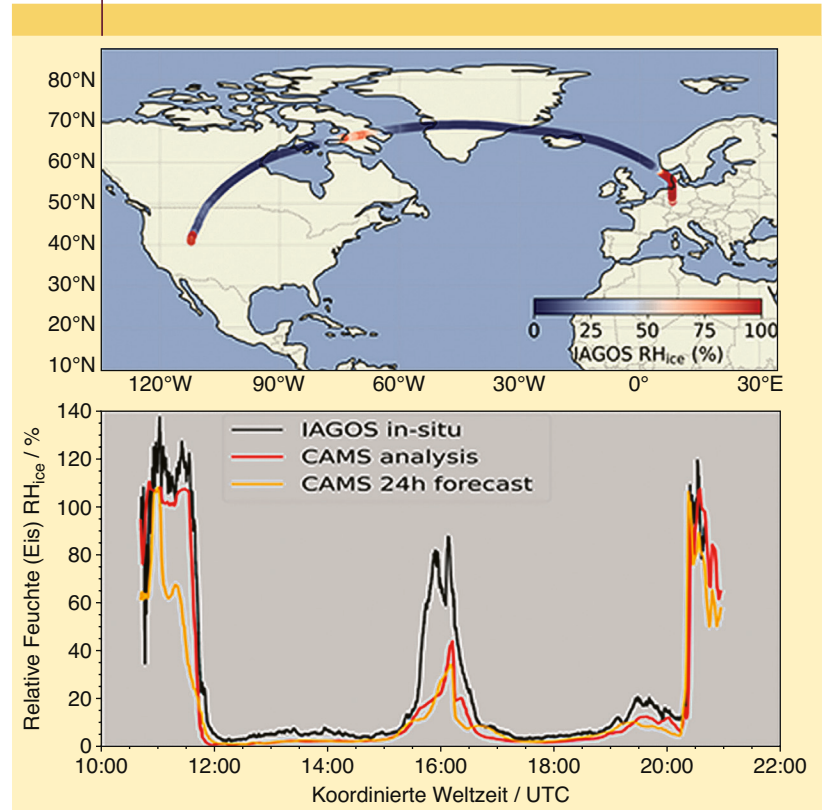
Hier helfen die IAGOS-Flugzeuge durch ihre umfangreichen Messungen in Reiseflughöhe. Ein Beispiel dazu ist in Abbildung 5 für einen Flug von Frankfurt nach Salt Lake City gezeigt. In den trockenen Luftmassen auf Reiseflughöhe stimmen die Modellresultate für die Vorhersage (orange) und die Reanalyse (rot) gut mit den Messungen (schwarz) überein, während insbesondere bei dem Durchflug eines Gebietes mit sehr feuchter Luft die Modellergebnisse erheblich von den Messungen abweichen. Bei einer Reanalyse wird ein Wettermodell mit zu einem früheren Zeitpunkt aufgezeichneten – oder historischen – Wetterdaten gestartet; das Modell liefert dann ein konsistentes, dreidimensionales Bild des damaligen Zustands der Atmosphäre. Derzeit wird intensiv an der Verbesserung der Darstellung eisübersättigter Luftmassen in den Modellen der Wetterdienste gearbeitet, da diese Regionen große Bedeutung für die Bildung von Eiswolken und Kondensstreifen haben; mehr dazu im Beispiel „Wasserdampf“. Die NRT-Daten stehen bisher für die Flugzeuge von IAGOS-CORE zur Verfügung.

IAGOS-CARIBIC

Bei IAGOS-CARIBIC wird ein komplexes, mit etwa 20 Instrumenten ausgestattetes Labor im Frachtraum eines modifizierten Airbus der Deutschen Lufthansa bei Langstreckenflügen von Europa zu vielen Zielen weltweit eingesetzt. Es werden rund 100 Spurengase, Aerosol- und Wolkenparameter gemessen, wobei der Schwerpunkt auf einer verbesserten Überwachung und einem besseren Verständnis vieler klimarelevanter Prozesse in der freien Atmosphäre liegt. IAGOS-CARIBIC ist weltweit einzigartig und sammelt hochpräzise, mehrkomponentige Langzeitdaten, die von vielen Anwendungen dringend benötigt werden und die von anderen Beobachtungssystemen nicht erzeugt werden können.

Das Lufthansa-Flugzeug A340-600 „Leverkusen“ (D-AIHE), das seit 2005 das Containerlabor CARIBIC transportierte, wurde im April 2020 aufgrund der COVID-19-Pandemie außer Dienst gestellt. Lufthansa und KIT haben sich jetzt für ein neues Flugzeug entschieden, das die nächste Generation von IAGOS-CARIBIC mit einem neuen Container-Labor und einer aktualisierten Nutzlast befördern soll. Das ausgewählte Flugzeug ist das treibstoffeffizienteste Langstreckenflugzeug der Lufthansa Gruppe des Typs Airbus A350-900 mit dem Namen „Erfurt“ und

ABB. 5 | WASSERDAMPF IN DER TROPOPAUSE

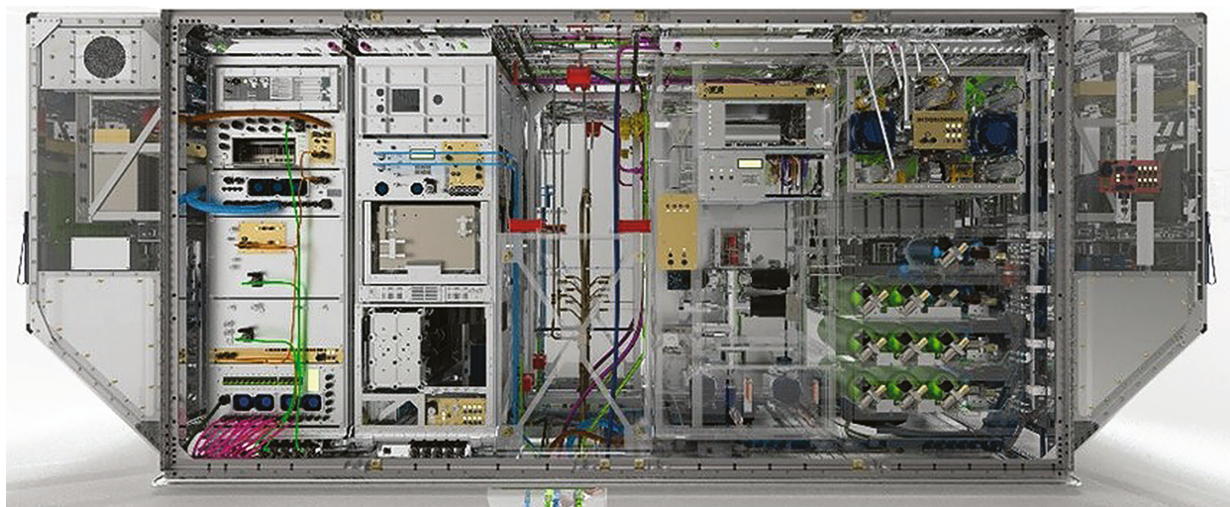


Wasserdampfmessungen auf dem Weg von Frankfurt nach Salt Lake City am 21. September 2023 werden an den Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS) übertragen und dort mit Modelldaten verglichen: orange für die Vorhersage, rot für die Reanalyse.



Abb. 6 Experten der Lufthansa Group haben am Flughafen München erstmals die eigens für das Projekt IAGOS-CARIBIC entwickelte Messsonde am unteren Flugzeugrumpf der Lufthansa A350 D-AIXJ angebracht (Foto: Oliver Roesler).

Abb. 7 Das im Aufbau befindliche neue IAGOS-CARIBIC-Labor (Designer: Simon Heger – CAD design & konstruktion).



der Kennung D-AIXJ. Die Umsetzungsphase begann 2021 in einem gemeinsamen Projekt des KIT, der Deutschen Lufthansa, Lufthansa Technik, Safran Engineering Services, der enviscope GmbH und weiteren hochspezialisierten Unternehmen der Luftfahrtindustrie. Abbildung 6 zeigt das neu entwickelte Einlasssystem am Rumpf der D-AIXJ und Abbildung 7 das im Aufbau befindliche neue Labor in einem Container, dessen Abmessungen denen eines Standard-Frachtcontainers entsprechen.

Wissenschaftliche Ziele von IAGOS

Übergeordnetes Ziel von IAGOS ist die Bereitstellung langer qualitätsgesicherter Zeitreihen und Messdaten über die chemische Zusammensetzung der Atmosphäre. Die längsten IAGOS-Zeitreihen von Ozon und

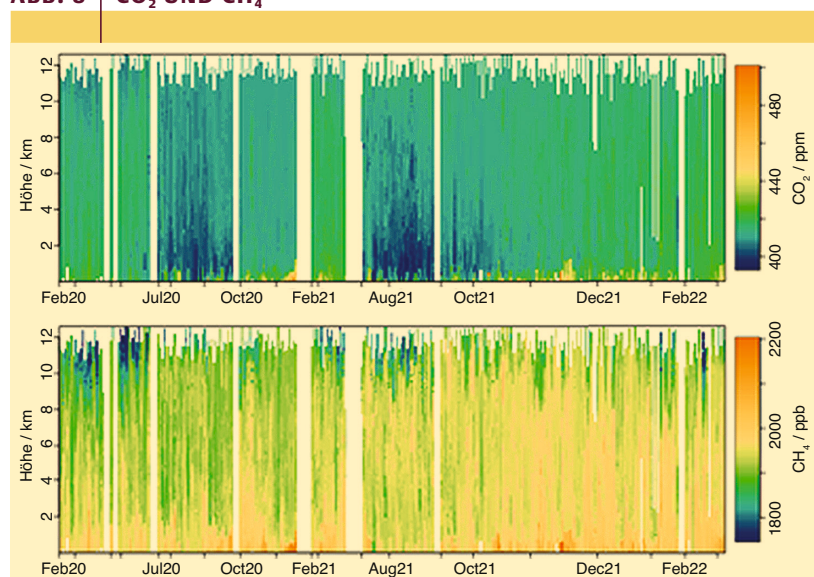
Wasserdampf umfassen inzwischen 30 Jahre und können damit für Klimastudien herangezogen werden. Der Zugang zu den Messdaten sowie zu den daraus abgeleiteten Datenprodukten in Form mittlerer Vertikalprofile, klimatologischer Auswertungen usw. ist gemäß den Open-Science-Prinzipien der Europäischen Union frei und unbeschränkt. Hierbei spielen auch die FAIR-Prinzipien eine Rolle; FAIR: Findable, Accessible, Interoperable, Re-usable. Daten sollen also für Nutzende auffindbar, zugreifbar, interoperabel und wiederverwendbar sein.

Die IAGOS-Daten entsprechen den höchsten Qualitätsstandards und werden von Forschenden in aller Welt für Prozessstudien, Trendanalysen und die Validierung von Klima- und Luftqualitätsmodellen verwendet. Darüber hinaus liefert IAGOS essenzielle Daten für die Validierung von Satellitenprodukten, insbesondere für sonst unzugängliche Regionen der Atmosphäre. Es ergänzt so weltraum- und bodengestützte Beobachtungen und vervollständigt damit das sich entwickelnde integrierte globale Erdbeobachtungssystem bestehend aus Bodenstationen, Satelliten, Schiffen und Flugzeugen.

Beispiel 1: Treibhausgasmessungen

Wie in der Einleitung beschrieben, liefern globale Beobachtungsnetze und Satelliten regelmäßig Daten. Im Fall der Treibhausgase ermöglichen sie in Kombination mit Atmosphärentransportmodellen eine unabhängige Quantifizierung des Austauschs von CO_2 und CH_4 . Dabei werden die beobachteten Treibhausgaskonzentrationen mit modellierten Konzentrationen durch optimale Anpassung der zeitlichen und räumlichen Verteilung der Quellen und Senken in Übereinstimmung gebracht. Im Rahmen des Klima-Übereinkommens von Paris hat man sich auf einen erweiterten Transparenzrahmen (Enhanced Transparency Framework) geeinigt, der unter anderem solche von den nationalen Inventarberichten unabhängige

ABB. 8 CO_2 UND CH_4



CO_2 - und CH_4 -Vertikalverteilung über Frankfurt aus IAGOS-CORE-Daten über einen Zeitraum von zwei Jahren.

beobachtungsbasierte Quantifizierungen ermöglicht beziehungsweise anregt.

Dies erfordert jedoch eine deutliche Verbesserung der Modellierung des atmosphärischen Transports, insbesondere der nicht von den Modellen räumlich und zeitlich aufgelösten Prozesse wie Wolkenkonvektion und turbulente Mischung. Dazu können IAGOS-Messungen von CO_2 und CH_4 , wie in Abbildung 8 dargestellt, wesentlich beitragen. Die vertikale Verteilung der langlebigen Gase mit starken Quellen und Senken (im Falle von CO_2) an der Erdoberfläche spiegelt die Transportprozesse wieder: Die deutliche Reduktion von CO_2 in den Sommermonaten in der unteren und mittleren Troposphäre zeigt, dass dessen verstärkte Aufnahme durch die Biosphäre sich durch vertikale Transportprozesse wie Wolkenkonvektion bis in Höhen von 10 km und höher auswirkt.

Detaillierte Vergleiche solcher Vertikalprofile mit Modellergebnissen (Abbildung 4) sind daher ein erster Schritt in Richtung einer verbesserten Transportmodellierung. Die Treibhausgasmessungen werden sowohl auf CORE-Flugzeugen (Tabelle 1) als auch im CARIBIC-Labor durchgeführt.

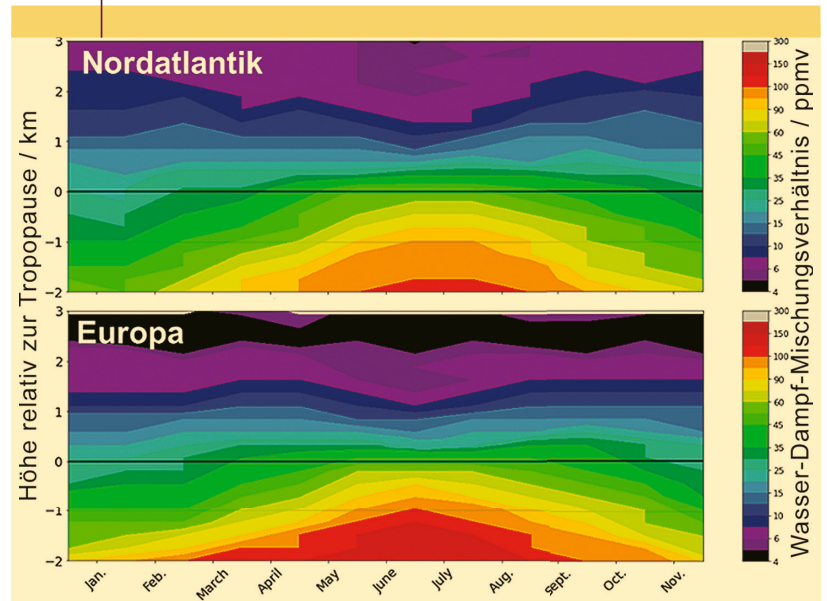
Beispiel 2: Wasserdampf

IAGOS steuert wesentliche Beobachtungsdaten zur Erforschung der Klimawirkung des Luftverkehrs und insbesondere zum Auftreten sogenannter eisübersättigter Gebiete bei, in denen die Luft sehr kalt ist und gleichzeitig mehr Wasser enthält, als sie bei der vorherrschenden Temperatur als Wasserdampf aufnehmen kann. Das überschüssige Wasser liegt in diesem Fall zumeist in Form von Eiskristallen vor. In diesen feuchten und kalten Luftpaketen bilden sich dann hohe Eiskwolken beziehungsweise Zirren, aber auch langlebige Kondensstreifen aus dem Luftverkehr mit einer hohen Klimawirksamkeit können hier entstehen. Mit IAGOS-Flugzeugen wird seit 1994 der Wasserdampf in der Atmosphäre beobachtet, was zu der Entdeckung führte, dass die obere Troposphäre viel feuchter ist als erwartet, siehe dazu Abbildung 9.

In zwei kürzlich veröffentlichten Studien haben IAGOS-Forschende gezeigt, dass es eine starke saisonale Variation des Auftretens von solchen eisübersättigten Luftmassen gibt, die eng mit dem Auftreten von Eiskwolken beziehungsweise Zirruswolken verbunden ist. Die Erkenntnis, dass eisübersättigte Luft im Allgemeinen kälter ist und weniger Ozon enthält als die umgebenden Luftmassen, hilft, die auf kleinen Skalen ablaufenden Prozesse in diesen Luftmassen besser zu verstehen. Bemerkenswert ist, dass für keine der untersuchten Regionen in den 15 Jahren der Messungen ein Trend in der Häufigkeit des Auftretens von eisgesättigten Luftmassen festgestellt wurde.

Die Rolle dieser spezifischen Luftmassen bei der Bildung von großräumigen und langlebigen

ABB. 9 | WASSERDAMPF



Verteilung des Wasserdampfes an der Tropopause über dem Nordatlantik und über Europa aus kombinierten IAGOS-CORE- und IAGOS-CARIBIC-Daten.

Kondensstreifen aus Passagierflugzeugen wird intensiv untersucht. Hier kann IAGOS mit seinen Wasserdampfmessungen einen wichtigen Beitrag zum wissenschaftlichen Verständnis der Klimaauswirkungen des Luftverkehrs liefern.

Zusammenfassung

IAGOS (In-service Aircraft for a Global Observing System) ist eine langfristig angelegte Forschungsinfrastruktur zur Erhebung wichtiger Daten über die Atmosphäre und die Luftqualität auf globaler Ebene. Die Daten umfassen essenzielle Klimavariablen wie Lufttemperatur, Treibhausgase (CO_2 , CH_4), reaktive Gase (O_3 , CO , NO_x), Aerosole, Wasserdampf und Wolken. Zur Messung betreibt IAGOS in Zusammenarbeit mit der Luftfahrtindustrie kompakte und autonome Messgeräte auf Langstreckenverkehrsflugzeugen. Die Daten werden täglich an Bord von zehn Passagierflugzeugen sowohl als Profile aus den Steig- und Sinkflugphasen als auch im Reiseflug geliefert. Zusätzlich betreibt IAGOS ein fliegendes Labor mit geringerer zeitlicher Abdeckung, aber deutlich höherer Zahl an Messparametern an Bord eines Passagierflugzeugs. Das IAGOS-Datenzentrum bietet seit dem Start der Messungen 1994 offenen und freien Zugang zu seinen Daten und Datenprodukten.

Stichwörter

IAGOS, In-service Aircraft for a Global Observing System, Atmosphärenforschung, Klimawandel, essenzielle Klimavariablen, globale Erdbeobachtung.

INTERNET

GCOS
<https://gcos.wmo.int/en/home>

IAGOS
<https://www.iagos.org>

CAMS
<https://atmosphere.copernicus.eu>

Danksagung

Die IAGOS-Daten werden seit dem Beginn der Messungen 1994 mit Unterstützung der Europäischen Kommission, der nationalen Forschungsministerien in Deutschland (BMBF), Frankreich (MESR) und dem Vereinigten Königreich (NERC), sowie der IAGOS-Mitgliedsinstitutionen erhoben. Die beteiligten Fluggesellschaften (Deutsche Lufthansa, Air France, China Airlines, Iberia, Cathay Pacific, Hawaiian Airlines, Eurowings Discover und Air Canada) unterstützen IAGOS durch den kostenlosen Transport der Messgeräte. Die Daten sind dank zusätzlicher Unterstützung von AERIS, Frankreich, auf dem IAGOS – Datenportal unter www.iagos.org frei und offen verfügbar. Die Autoren danken Prof. A. Wahner (FZJ ICE-3) und Prof. P. Braesicke (KIT, IMK) für ihre dauerhafte Unterstützung der IAGOS-Aktivitäten an ihren jeweiligen Instituten, sowie U. Bundke (FZJ ICE-3), H. Bönsch (KIT IMK) und dem gesamten Team der enviscope GmbH für ihre unentbehrliche Arbeit im technisch-wissenschaftlichen Betrieb.

Open-Access-Veröffentlichung ermöglicht und organisiert durch Projekt DEAL.

Literatur

- [1] GCOS, The 2022 GCOS Implementation Plan, WMO (Hg.), World Meteorological Organization, Genf 2022, S. 85.
- [2] S. Bojinski et al., Bull. Am. Meteorol. Soc. **2014**, 95(9), 1431.
- [3] IPCC, Synthesis Report of the IPCC 6th Assessment Report (AR6), IPCC, Genf 2023, S. 184.
- [4] G. R. Carmichael et al., Bull. Am. Meteorol. Soc. **2023**, 104(3), E666.
- [5] V. Thouret et al., IAGOS: Monitoring Atmospheric Composition for Air Quality and Climate by Passenger Aircraft, in Handbook of Air Quality and Climate Change, H. Akimoto & H. Tanimoto (Hg.), Springer Nature, Singapur 2022, S. 1.
- [6] A. Petzold et al., Tellus B: Chem. Phys. Meteorol. **2015**, 67, 28452.
- [7] A. Gettelman et al., Rev. Geophys. **2011**, 49(3), RG3003.
- [8] J. Eyre, R. Reid, Cost-benefit studies for observing systems, Forecasting Research Technical Report No: 593., Uk MetOffice, Exeter (UK) 2014, S. 12.
- [9] A. Marenco et al., J. Geophys. Res. D: Atmos. **1998**, 103(D19), 25631.
- [10] C. A. M. Brenninkmeijer et al., J. Atmos. Oceanic Technol. **1999**, 16(10), 1373.
- [11] S. Arnold et al., Physik in unserer Zeit **2020**, 51(1), 22.
- [12] V. H. Peuch et al., Bull. Am. Meteorol. Soc. **2022**, 103(12), E2650.

Die Autoren



Andreas Petzold leitet die Forschungsgruppe für globale Beobachtung am Institute of Climate and Energy Systems – Troposphere (ICE-3) des Forschungszentrums Jülich. Eine seiner Hauptaufgaben ist die Koordinierung von IAGOS. Außerdem ist er Professor an der Bergischen Universität Wuppertal und Mitglied der wissenschaftlichen Beratergruppe Aerosole des Global Atmosphere Watch Programms der Weltorganisation für Meteorologie.



Susanne Rohs arbeitet in der Forschungsgruppe für globale Beobachtung am Institute of Climate and Energy Systems – Troposphere (ICE-3) des Forschungszentrums Jülich. Sie ist hauptverantwortliche Wissenschaftlerin für die IAGOS-Wasserdampf-messungen. Ihr Hauptinteresse gilt der Bestimmung von Langzeittrends sowie der Untersuchung von Auswirkungen des Luftverkehrs auf das Klima.



Christoph Gerbig leitet die Gruppe „Flugzeuggestützte Messungen und mesoskalige Modellierung“ in der Abteilung Biogeochemische Signale am Max-Planck-Institut für Biogeochemie in Jena und ist verantwortlich für die Treibhausgasmessungen im Rahmen der IAGOS-Beobachtungsinfrastruktur. Außerdem ist er Mitglied der wissenschaftlichen Beratergruppe Treibhausgase des Global Atmosphere Watch-Programms der Weltorganisation für Meteorologie.



Andreas Zahn ist Wissenschaftler mit über dreißig Jahren Erfahrung in der Entwicklung von Instrumenten zur Messung von Spurengasen und deren Einsatz auf Forschungs- und Passagierflugzeugen. Er leitet die Arbeitsgruppe „Flugzeuggestützte Messungen in der Tropopausenregion“ am Institut für Meteorologie und Klimaforschung (IMK) am Karlsruhe Institut für Technologie (KIT) und koordiniert das IAGOS-CARIBIC-Labor.

Anschrift

Prof. Dr. Andreas Petzold, Institute of Climate and Energy Systems - Troposphere (ICE-3), Forschungszentrum Jülich GmbH, 52425 Jülich. a.petzold@fz-juelich.de

Dr. Susanne Rohs, Institute of Climate and Energy Systems - Troposphere (ICE-3), Forschungszentrum Jülich GmbH, 52425 Jülich. s.rohs@fz-juelich.de

Dr. habil Christoph Gerbig, Max Planck Institute for Biogeochemistry, Beutenberg Campus, Hans-Knöll-Straße 10, 07745 Jena. cgerbig@bgc-jena.mpg.de

Dr. Andreas Zahn, Karlsruher Institut für Technologie, IMK-ASF, Postfach 36 40, 76021 Karlsruhe. andreas.zahn@kit.edu