

# Feinstaub und Vulkanasche in der Erdatmosphäre – Mit Forschungsflugzeugen weltweit im Einsatz –

Andreas Minikin

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR)

Institut für Physik der Atmosphäre

Oberpfaffenhofen



Wissen für Morgen



# Inhaltsübersicht

## → **Aerosolpartikel in der Atmosphäre**

Woher stammen die Aerosole?

Wo in der Atmosphäre treten sie auf?

Welche Eigenschaften?

Welche Auswirkungen, insbesondere auf das Klima?

## → **Messungen mit Forschungsflugzeugen**

Falcon, HALO und andere Forschungsflugzeuge

Wie kann man vom Flugzeug aus Partikel messen?

Welche Einsatzgebiete?

## → **Beispiele von Flugzeug-Forschungsprojekten**

Luftverschmutzung in der Arktis

Gewitter

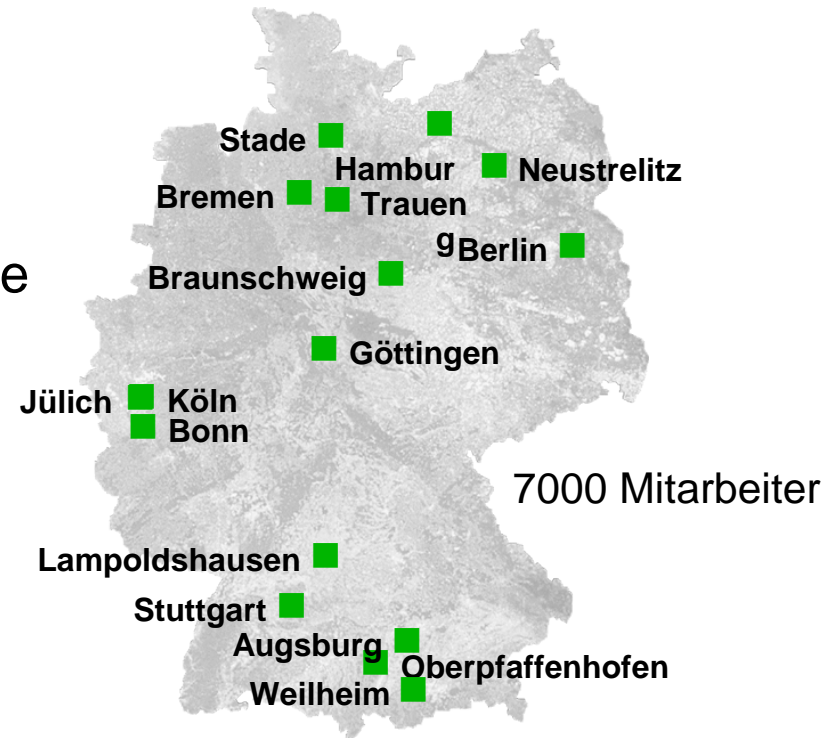
Vulkanasche



# Das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.

## Forschungsbereiche

- Luftfahrt
- Raumfahrtforschung und –technologie
- Verkehr
- Energie
- Raumfahrtmanagement
- Projektträger



# DLR Standort Oberpfaffenhofen (südwestlich von München)

Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter: ca. 1.600

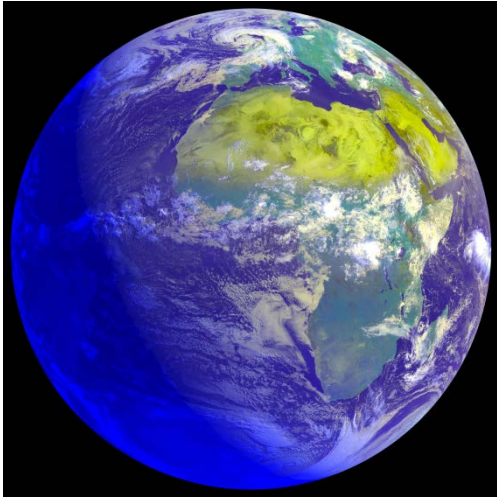
Direkte Anbindung an Sonderflughafen  
Oberpfaffenhofen

## **Forschungsinstitute und Einrichtungen:**

- Institut für Robotik und Mechatronik
- Institut für Hochfrequenztechnik und Radarsysteme
- Institut für Kommunikation und Navigation
- Institut für Physik der Atmosphäre
- Institut für Methodik der Fernerkundung
- Deutsches Fernerkundungsdatenzentrum
- Flugexperimente
- Raumflugbetrieb und Astronautentraining
- Gesellschaft für Raumfahrtanwendungen



# Die Aufgaben des Instituts für Physik der Atmosphäre



## Forschung zur Physik der Atmosphäre

**Atmosphärenforschung:** Dynamik, Zusammensetzung, Chemie, Strahlung, Wolkenphysik

**Klima:** das letzte und das kommende Jahrhundert

**Meteorologie:** Beobachtungen und Vorhersagemethoden

Forschung für umweltverträgliche **Luftfahrt**

Entwicklung und Anwendung von **Erdbeobachtung**

Forschung für umweltverträglichen **Verkehr**



Entwicklung der erforderlichen **Methoden**

**Anwendungen** und Vermarktung

**Ausbildung** von wissenschaftlichem Nachwuchs

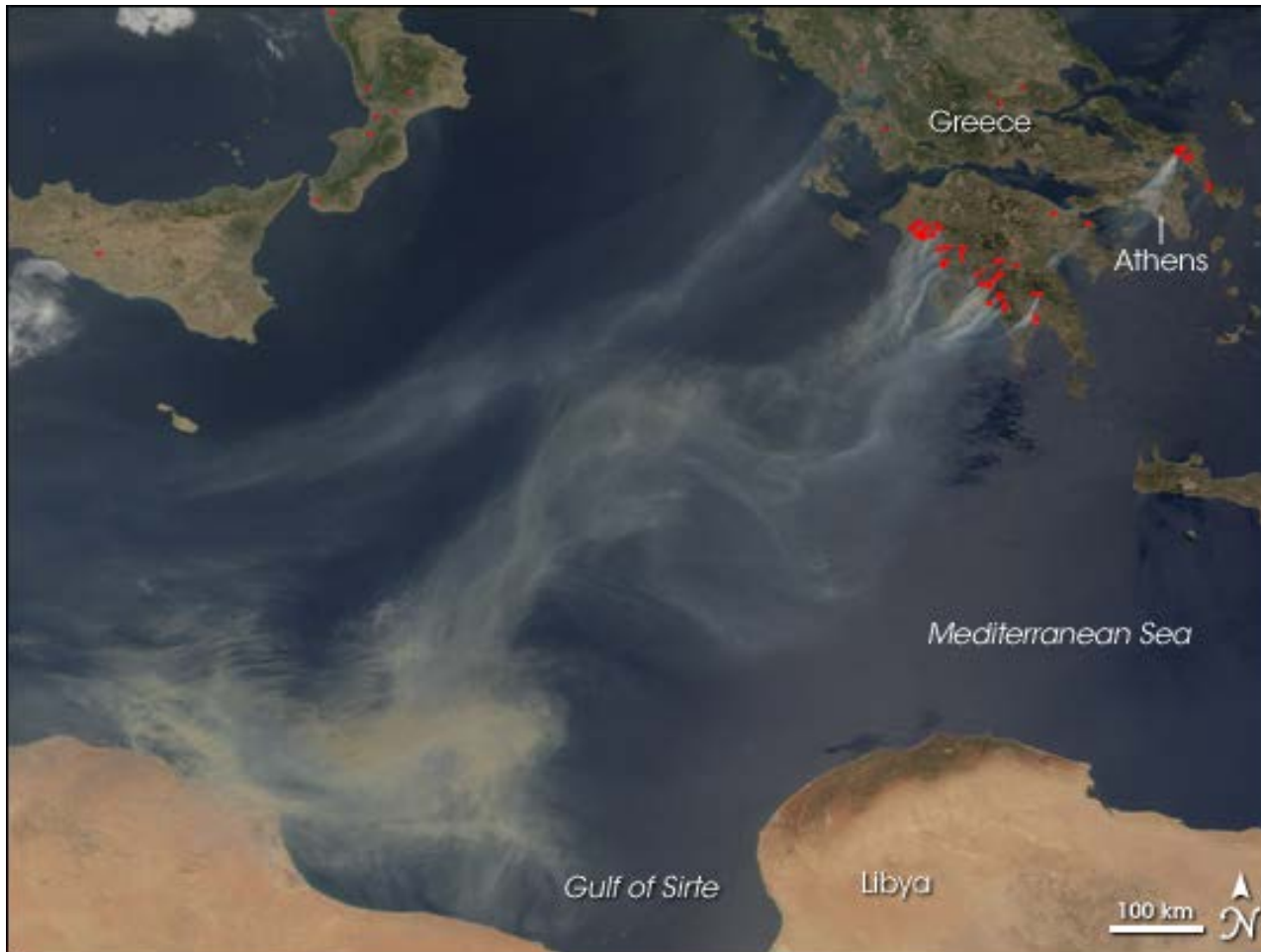


# Aerosole in der Atmosphäre

Unsere Atmosphäre enthält stets Aerosolpartikel unterschiedlichen Typs und unterschiedlicher Konzentration.

Enthalten sind:

- Pollen, Sporen, Bakterien
- Staub, Rauch, Meersalz
- Rauch, Asche oder Stäube
- ultrafeine Partikel aus Vorläufergasen (Schwefelsäure)
- Wassertropfen/Eiskristalle

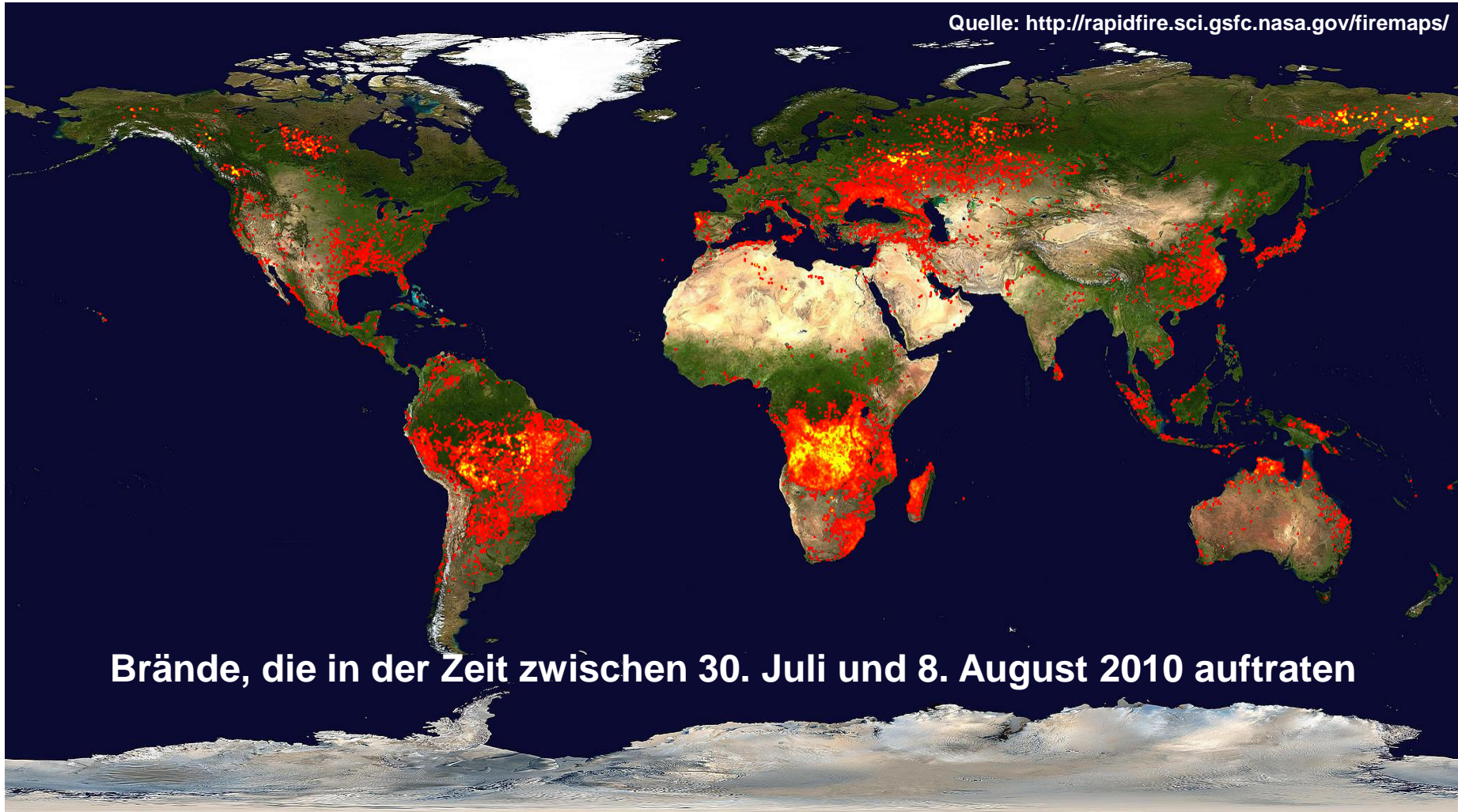


Waldbrände in Griechenland im August 2007



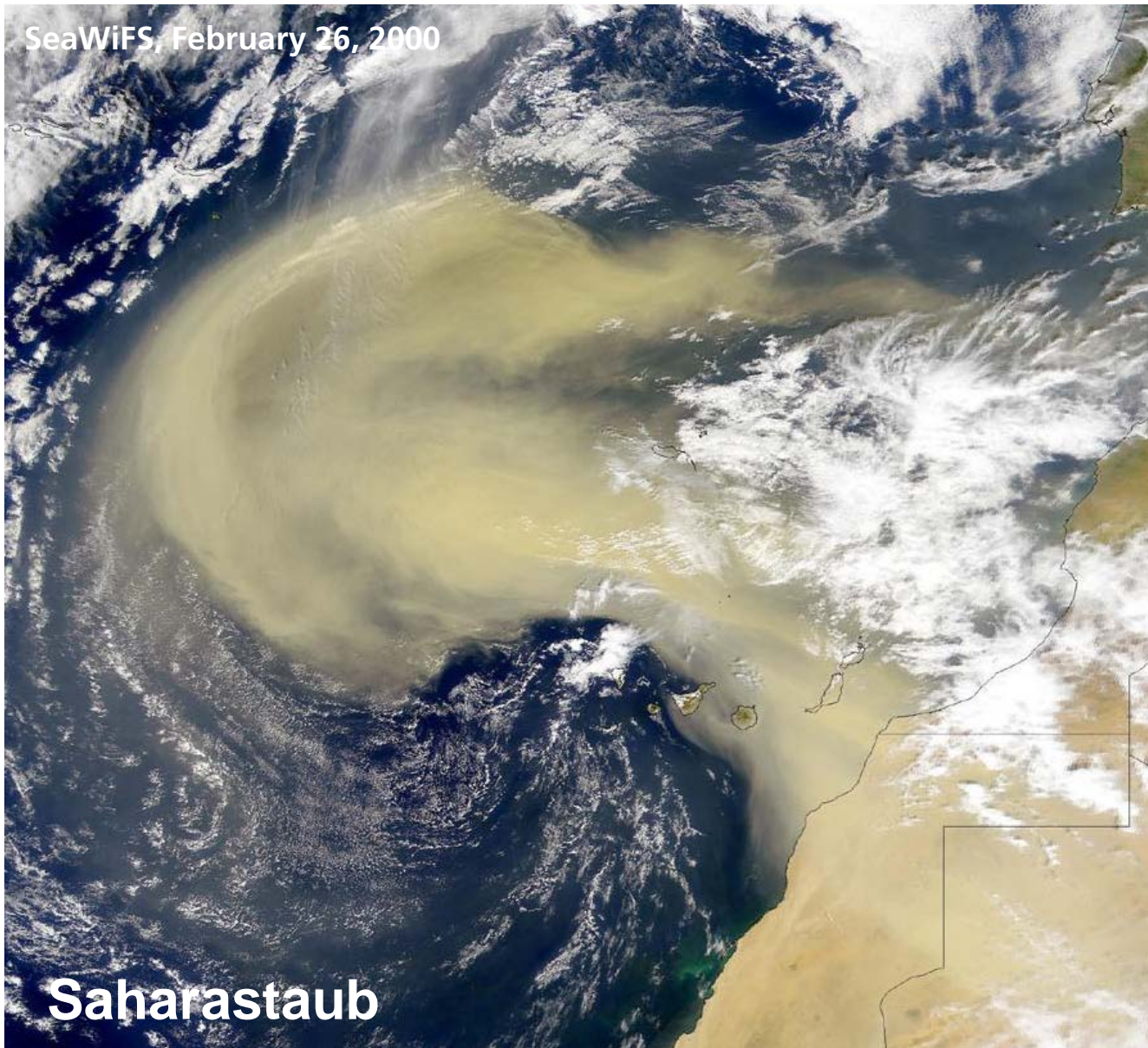
# Wald- und Vegetationsbrände treten häufig auf

Quelle: <http://rapidfire.sci.gsfc.nasa.gov/firemaps/>





SeaWiFS, February 26, 2000

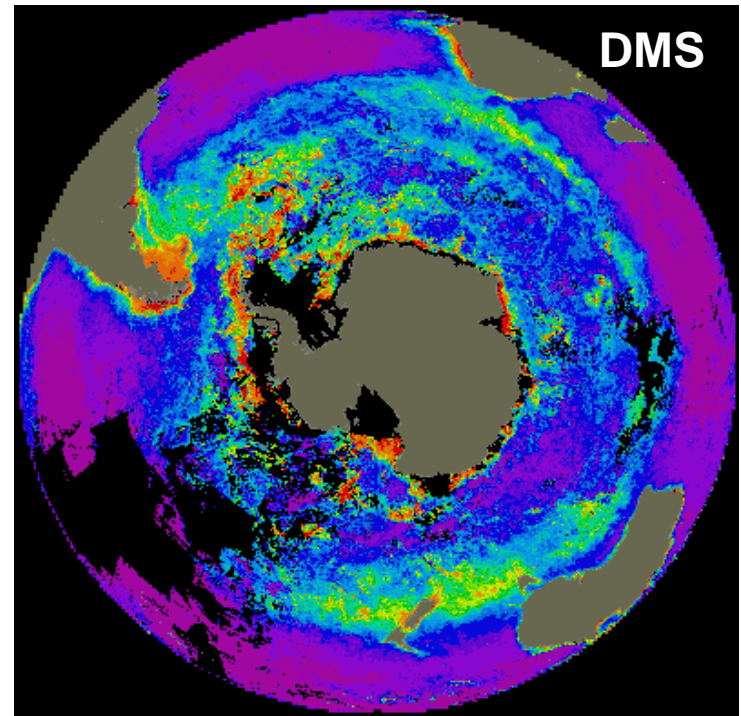
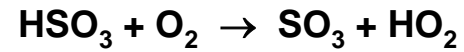


**Saharastaub**

[http://earthobservatory.nasa.gov/Newsroom/NewImages/images.php3?img\\_id=1520](http://earthobservatory.nasa.gov/Newsroom/NewImages/images.php3?img_id=1520)

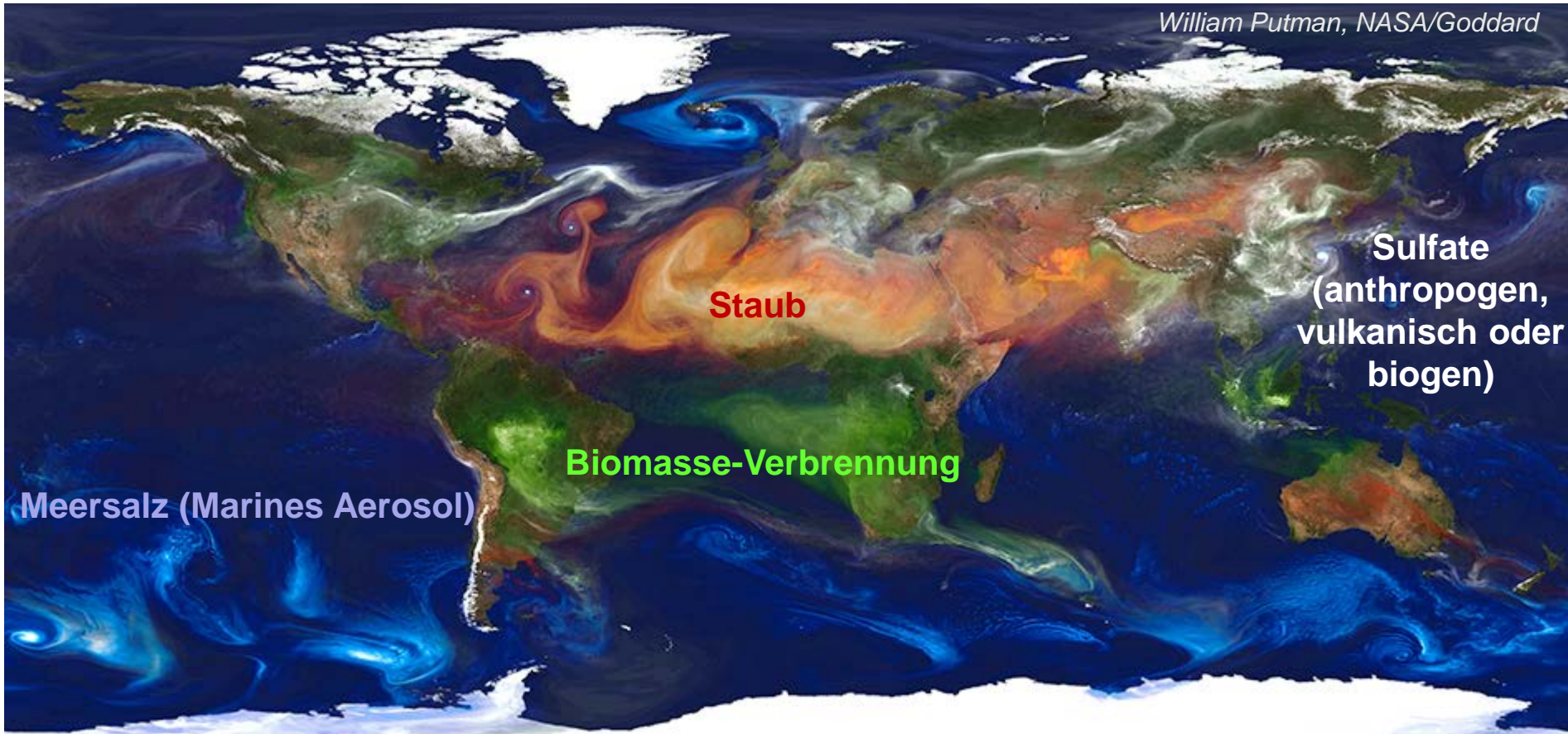


# Aerosole entstehen auch aus Gasen wie Schwefeldioxid oder Dimethylsulfid



# Quellen des atmosphärischen Aerosols - Modellsimulation

*William Putman, NASA/Goddard*



Meersalz (Marines Aerosol)

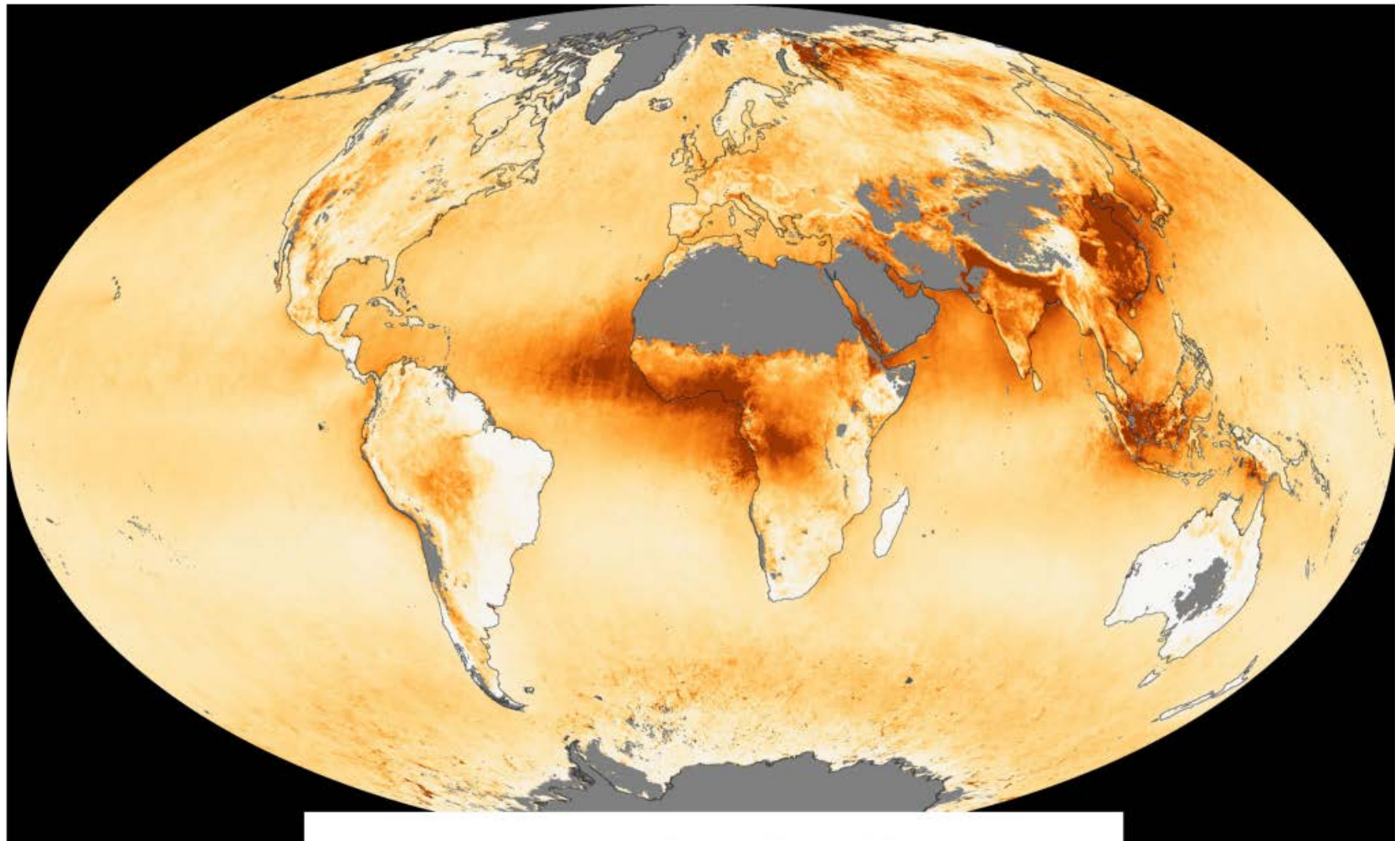
Staub

Biomasse-Verbrennung

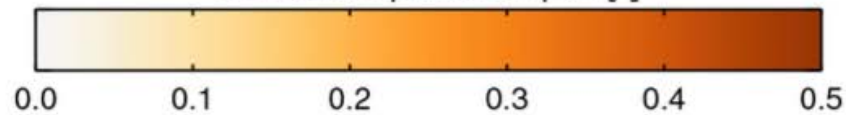
Sulfate  
(anthropogen,  
vulkanisch oder  
biogen)



# Globale Aerosolverteilung vom Satelliten



Aerosol Optical Depth [-]



<http://climate.gsfc.nasa.gov/viewImage.php?id=199>





**Aerosolschichten**



particle group

anthropogenic

secondary

natural

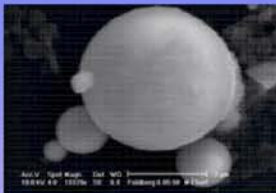
industrial

carbonaceous

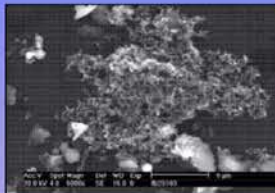
sea salt

soil

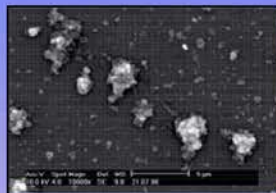
carbonaceous



silicate-flyash



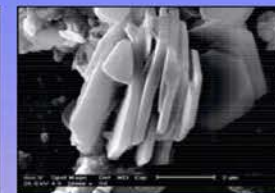
soot



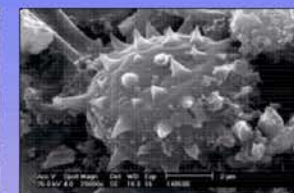
ammonium sulfate



sea salt



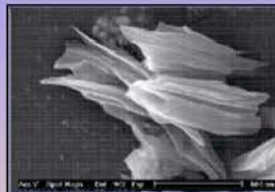
silicate



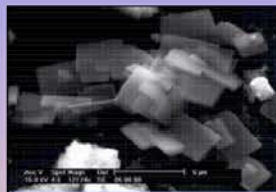
biological



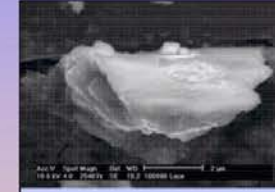
Al-, Ti-, Fe-oxide



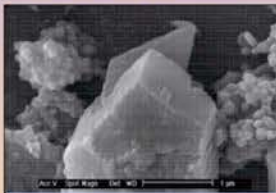
organic



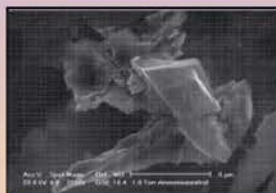
Calcium sulfate



quartz



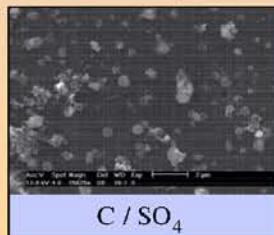
Calcium sulfate



ammonium nitrate



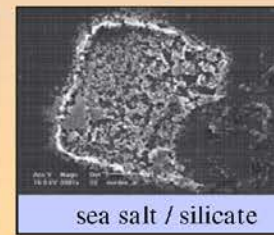
metal oxide



C / SO<sub>4</sub>



aged sea salt



sea salt / silicate

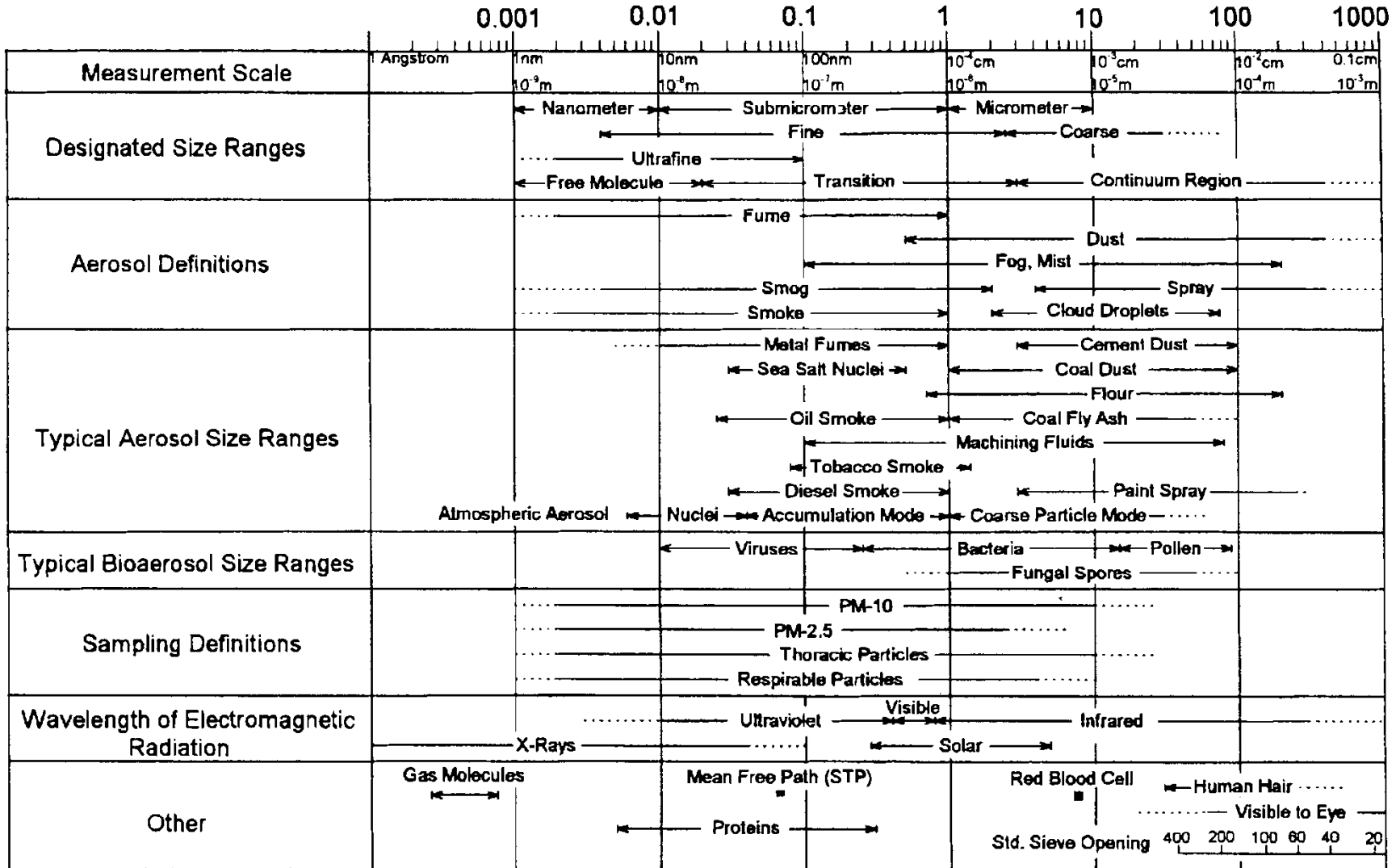
# Weiter Bereich der Größen von Aerosolpartikeln (Durchmesser)

Nanometer

Mikrometer

Millimeter

Particle Diameter,  $\mu\text{m}$

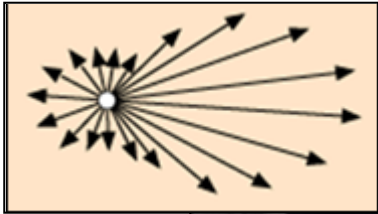


Hinds, Aerosol Technology, 1999



# Wirkungen des atmosphärischen Aerosols

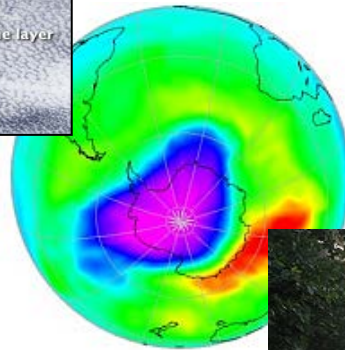
**Streuung, Absorption (Klimaeffekt direkt)**



**Einfluss auf Wolken (Klimaeffekt indirekt)**



**Wechselwirkung mit Gasphasenchemie**



**Sichtweite, „global dimming“**



**Gesundheit, Lufthygiene, Regulierung**

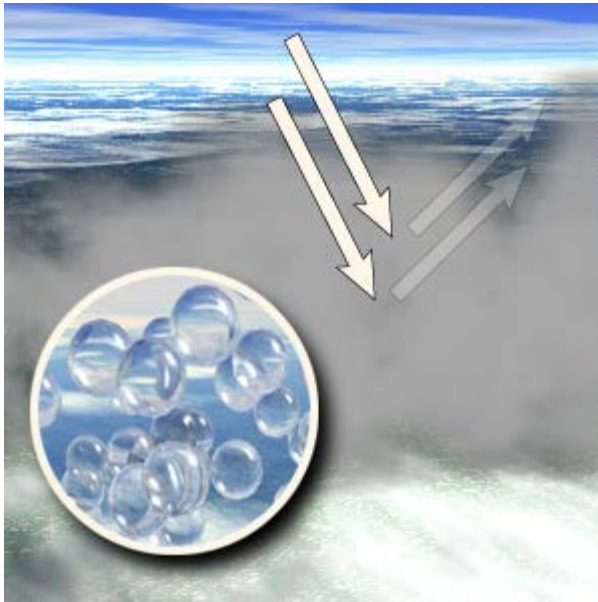
Angriffsorte	Partikel-durchmesser
Nasen-Rachenraum	5-10 $\mu\text{m}$
Lufttröhre	3-5 $\mu\text{m}$
Bronchien	2-3 $\mu\text{m}$
Bronchiolen	1-2 $\mu\text{m}$
Alveolen (Lungenbläschen)	0,1-1 $\mu\text{m}$

**Wirkung auf Ökosysteme**

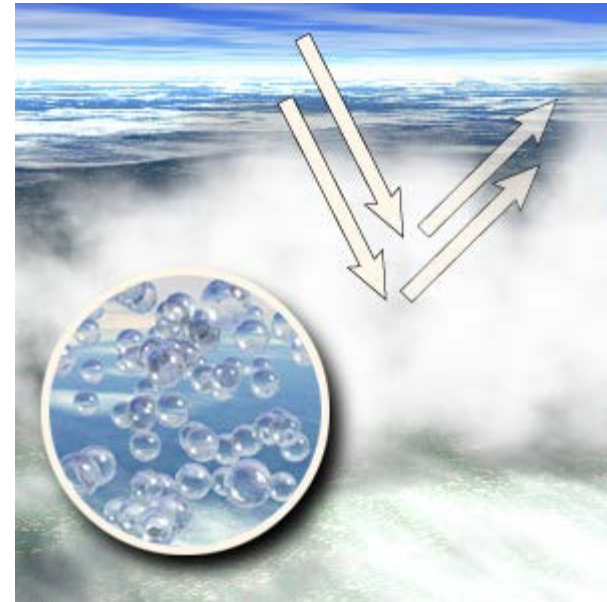




# Wolkenbildung - nur über Aerosolpartikel als Kondensationskeime



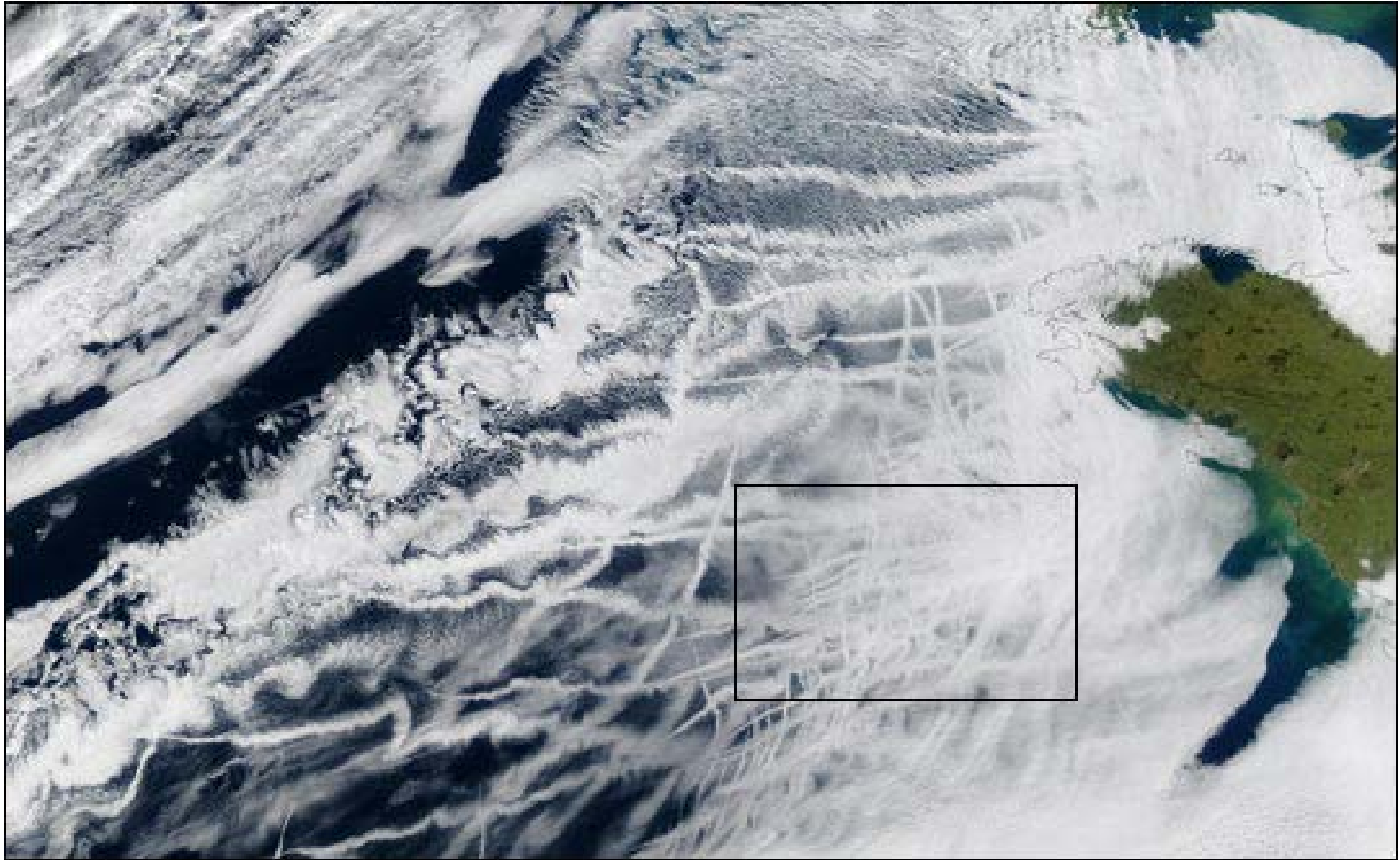
**"sauber"**



**"verschmutzt"**



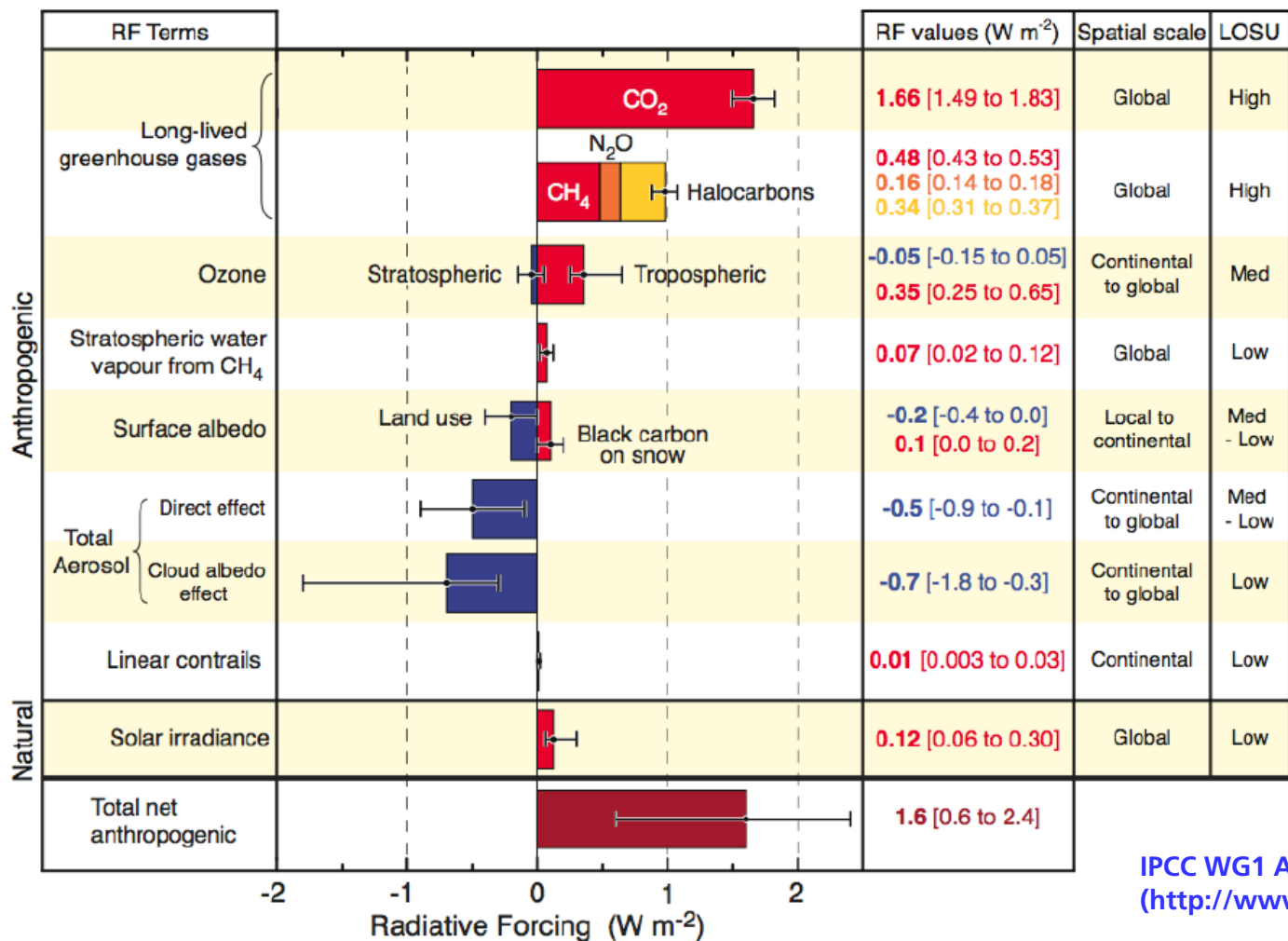
# "Ship tracks"



True Color



# Radiative Forcing Components



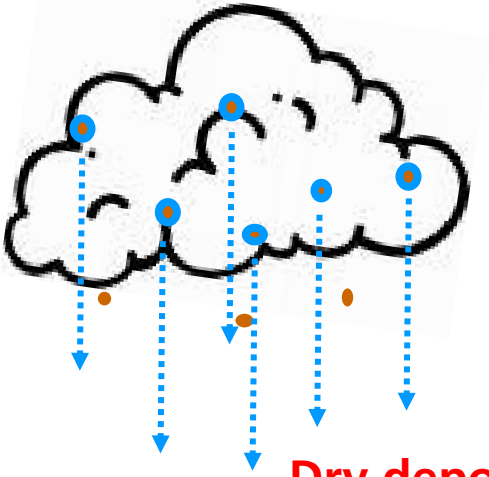
IPCC WG1 AR4 Report, 2007  
<http://www.ipcc.ch/>

**FIGURE SPM-2.** Global-average radiative forcing (RF) estimates and ranges in 2005 for anthropogenic carbon dioxide ( $CO_2$ ), methane ( $CH_4$ ), nitrous oxide ( $N_2O$ ) and other important agents and mechanisms, together with the typical geographical extent (spatial scale) of the forcing and the assessed level of scientific understanding (LOSU). The net anthropogenic radiative forcing and its range are also shown. These require summing asymmetric uncertainty estimates from the component terms, and cannot be obtained by simple addition. Additional forcing factors not included here are considered to have a very low LOSU. Volcanic aerosols contribute an additional natural forcing but are not included in this figure due to their episodic nature. Range for linear contrails does not include other possible effects of aviation on cloudiness. {2.9, Figure 2.20}

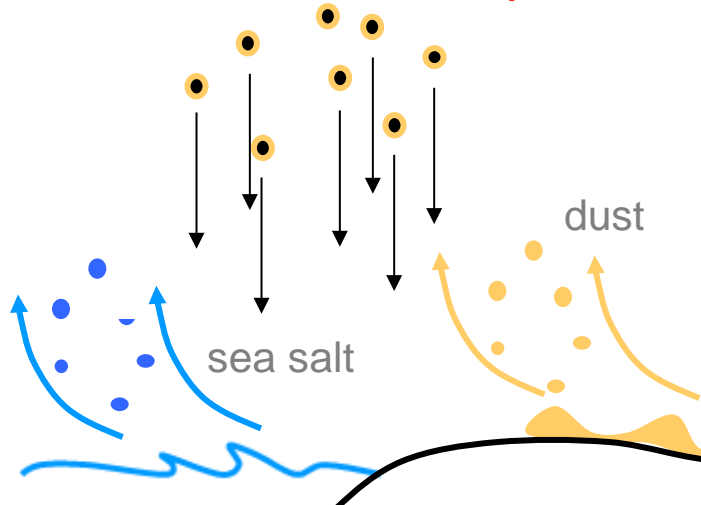
# Prozesse / Lebenszyklus

Dilution during transport

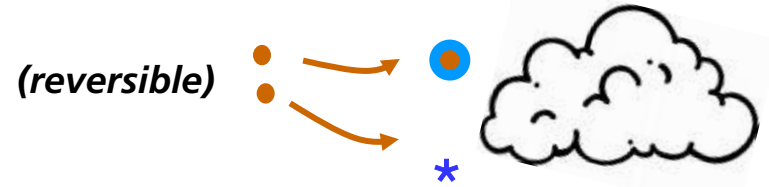
**Wet deposition**  
(rain-out, wash-out)



**Dry deposition**  
(sedimentation, turbulent deposition)



**Activation (forming cloud droplets or ice)**  
aerosols act as cloud condensation nuclei



Particle break-up

Particle growth

Coagulation

**Nucleation**

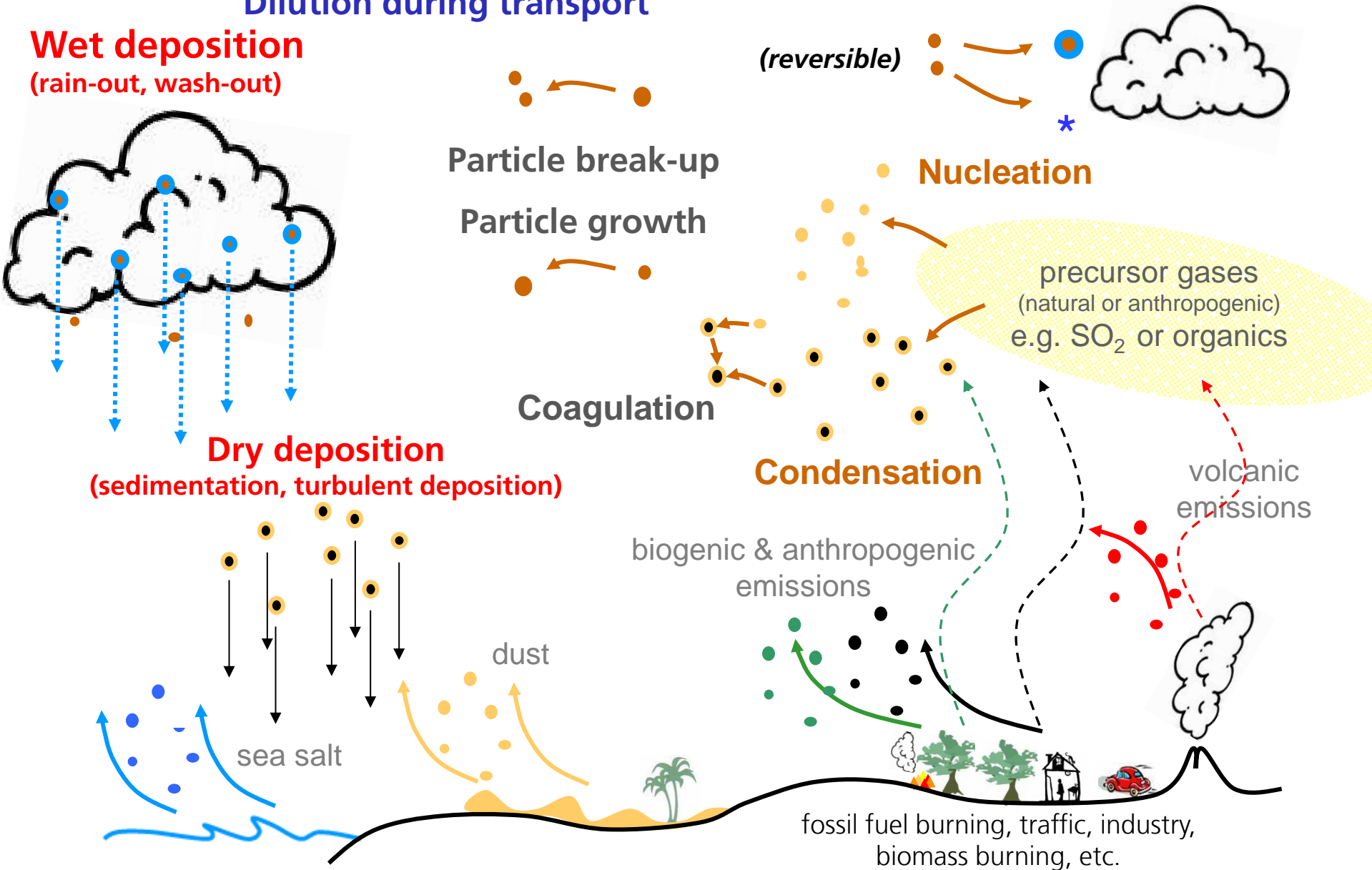
**Condensation**

precursor gases  
(natural or anthropogenic)  
e.g. SO<sub>2</sub> or organics

volcanic emissions

biogenic & anthropogenic emissions

fossil fuel burning, traffic, industry,  
biomass burning, etc.



# Inhaltsübersicht

## → Aerosolpartikel in der Atmosphäre

Woher stammen die Aerosole?

Wo in der Atmosphäre treten sie auf?

Welche Eigenschaften?

Welche Auswirkungen, insbesondere auf das Klima?

## → Messungen mit Forschungsflugzeugen

Falcon, HALO und andere Forschungsflugzeuge

Wie kann man vom Flugzeug aus messen?

Welche Einsatzgebiete?

## → Beispiele von Flugzeug-Forschungsprojekten

Luftverschmutzung in der Arktis

Gewitter

Vulkanasche



# Messungen atmosphärischer Partikel mit Forschungsflugzeugen

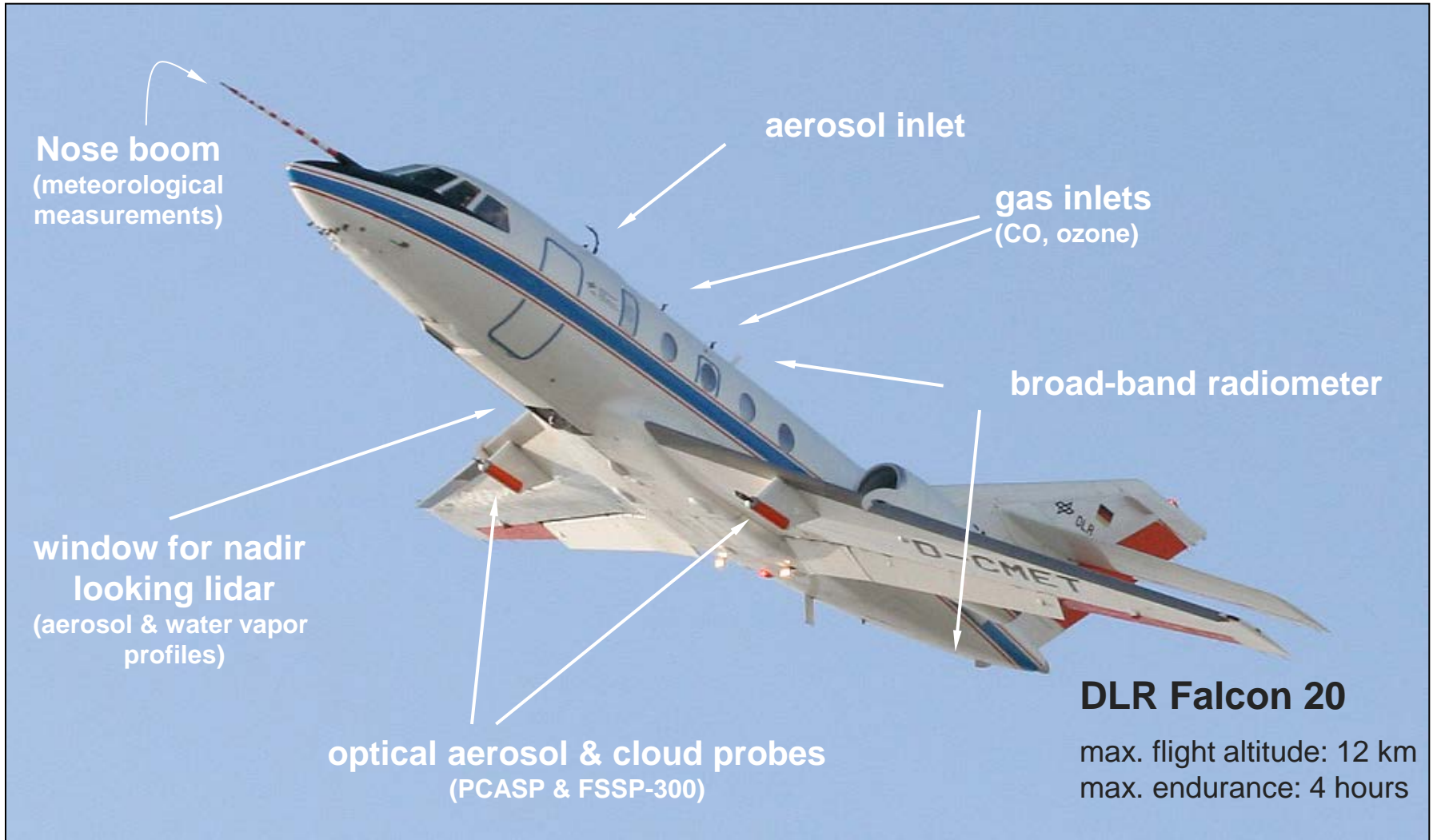


HALO

200 m/s

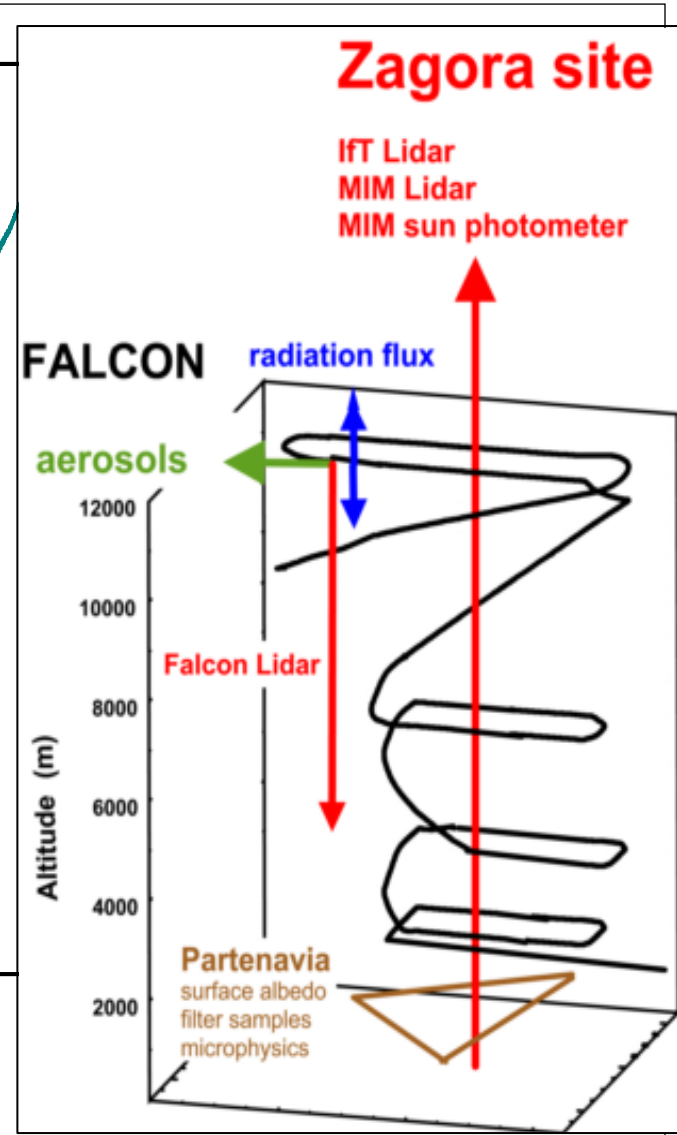
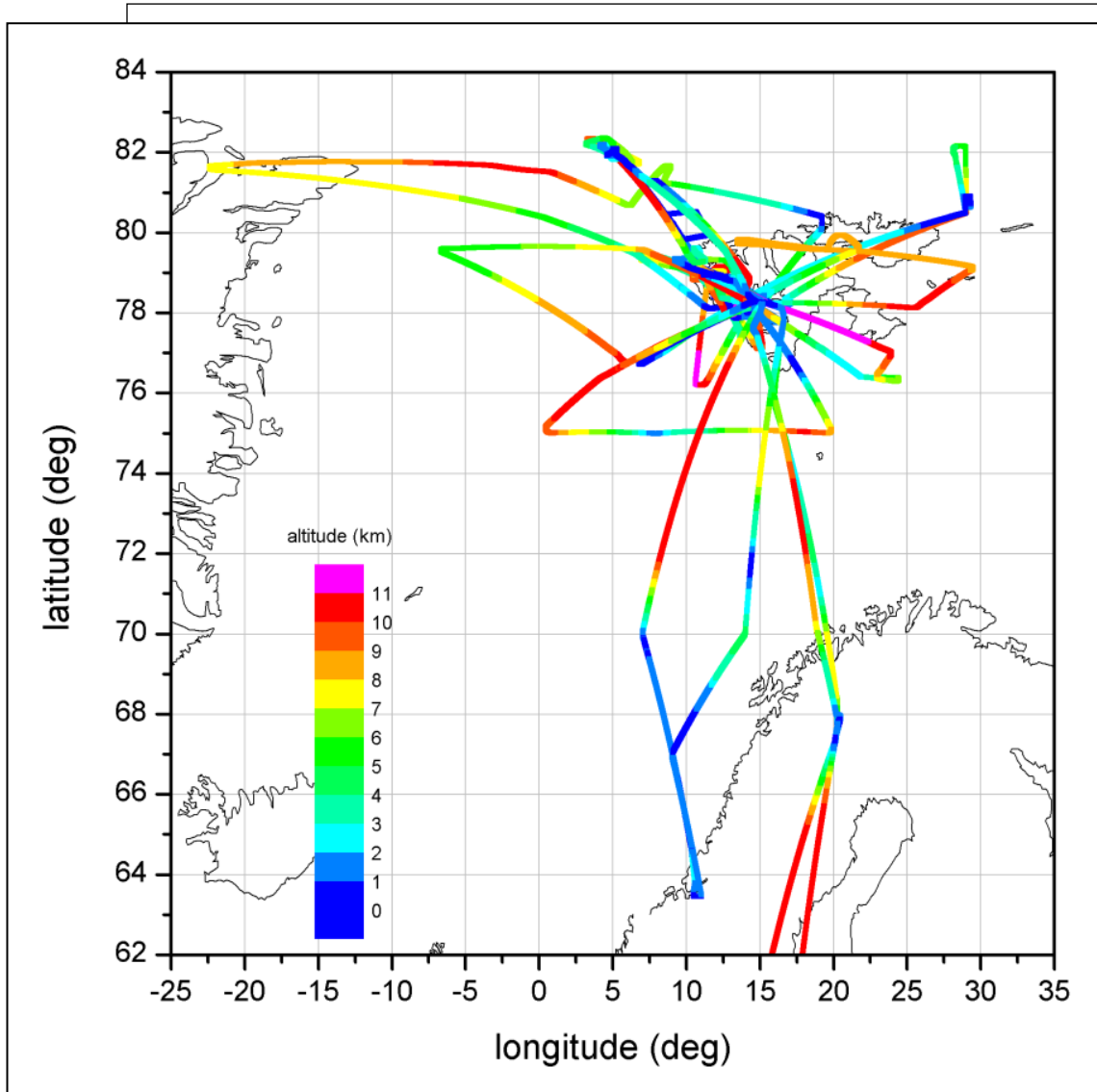
150 hPa

0-14 km Flughöhe









**FAAM BAe-146**



**DLR Falcon**



**SAFIRE Falcon 20  
(France)**



**SAFIRE ATR  
(France)**





Geophysica



NASA DC-8

# „Polar 5“ des AWI (Basler BT-67)

in Inuvik, Kanadadische Arktis, VERDI-Kampagne, 2012



**„Polar 2“ des AWI (Dornier-228)  
in der Antarktis, 2006**



**„Polar 2“ des AWI (Dornier-228)  
in der Antarktis, 2006**



# Die Zukunft: HALO

High Altitude – Long Range



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung



HELMHOLTZ  
GEMEINSCHAFT

Deutsche  
Forschungsgemeinschaft

DFG



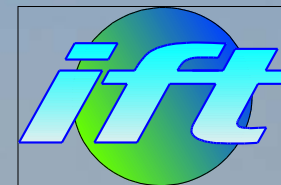
Deutsches Zentrum  
für Luft- und Raumfahrt e.V.  
in der Helmholtz-Gemeinschaft



JÜLICH  
FORSCHUNGSZENTRUM

GFZ

Helmholtz-Zentrum  
POTSDAM



MAX-PLANCK-GESELLSCHAFT



Forschungszentrum Karlsruhe  
in der Helmholtz-Gemeinschaft

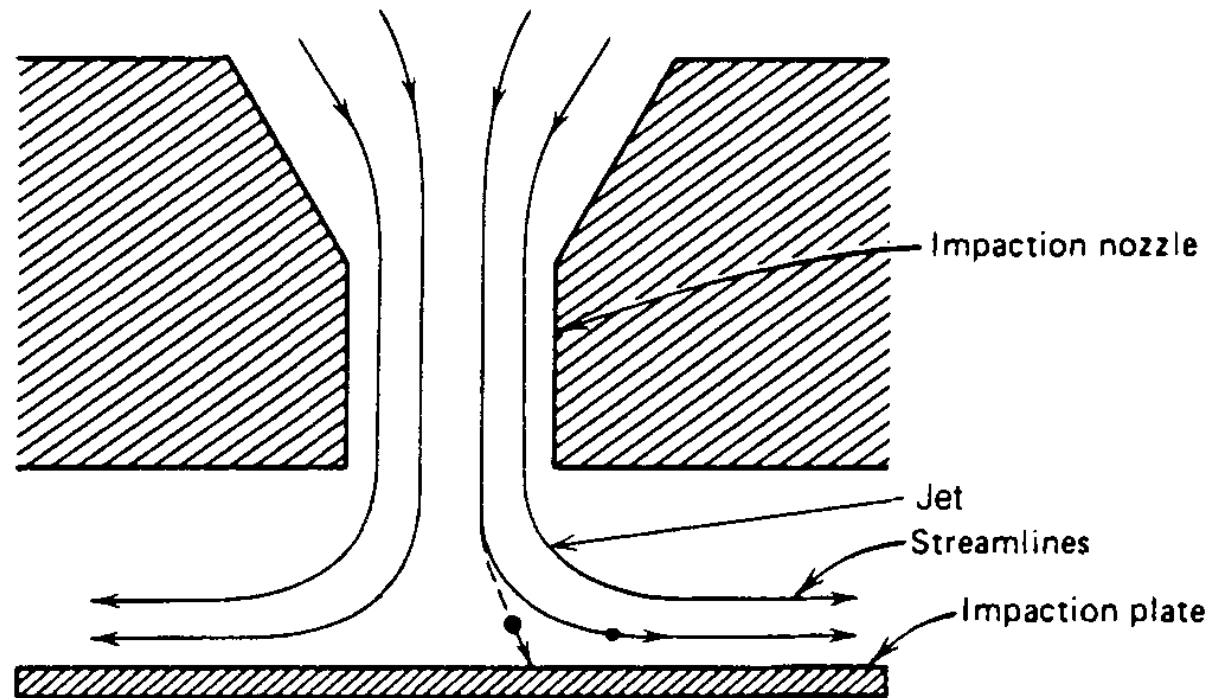
# Messungen von Aerosolpartikeln vom Flugzeug Wo und wie?



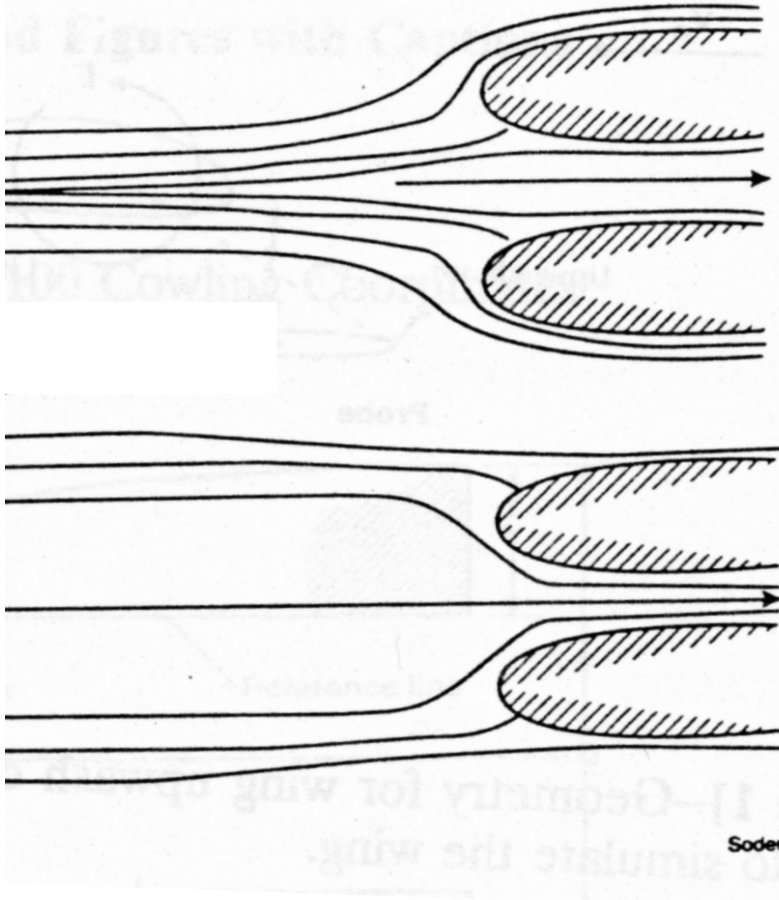


# Impaktor-Prinzip

→ große Partikel folgen nicht der Luftströmung



# Isokinetische Probennahme



## Sub-isokinetisch

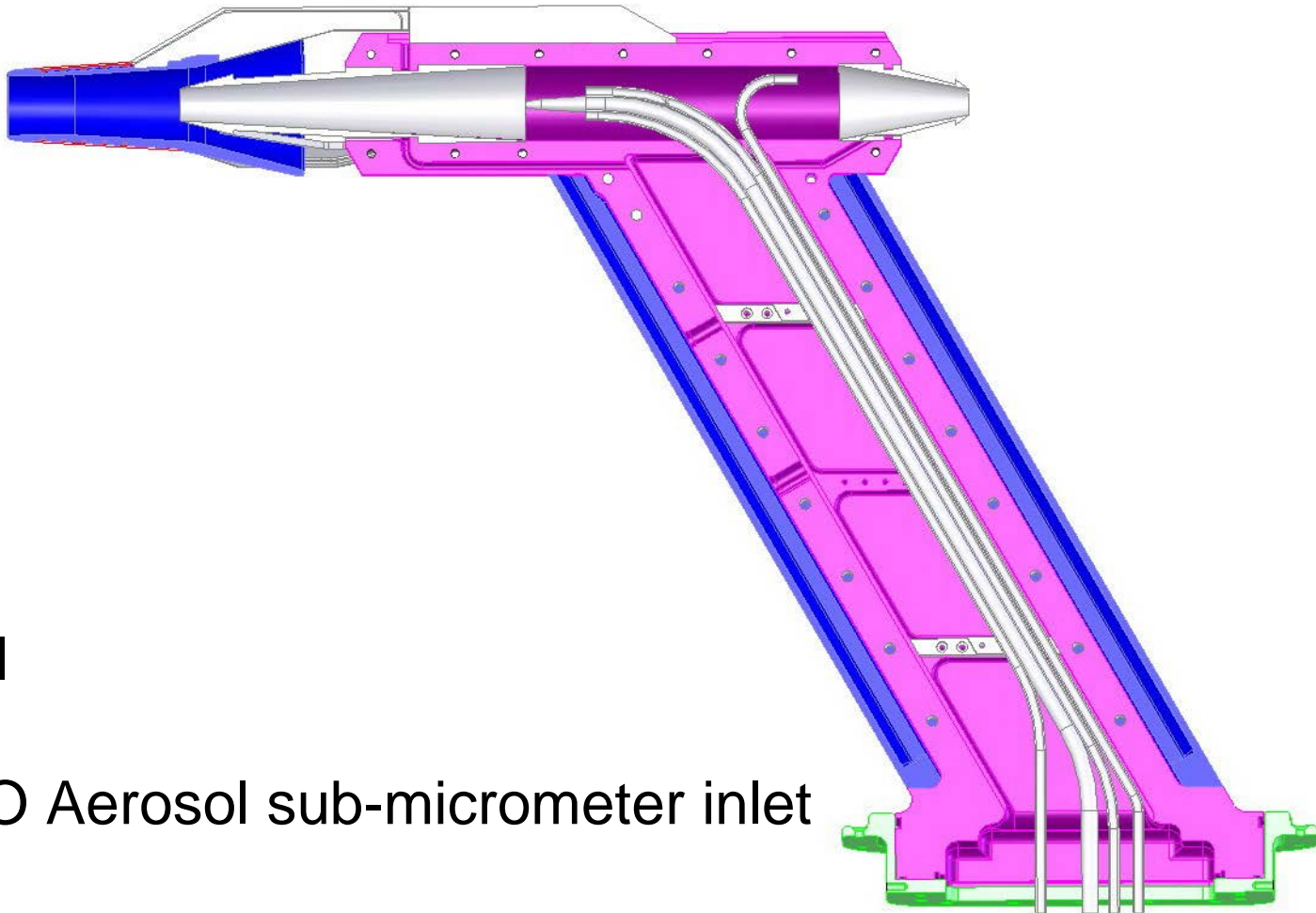
- Stromlinien nach außen um Einlass verbogen.
- Große Partikel folgen dem nicht → Anreicherung

## Über-isokinetisch

- Stromlinien nach innen in Einlass hinein verbogen
- Große Partikel erreichen den Einlass nicht → Abreicherung

**Große Partikel größer 1-3  $\mu\text{m}$  können nicht in der Kabine vermessen werden  
→ Messinstrumente in Flügelstationen (Staub, Wolkentropfen, Eiskristalle)**



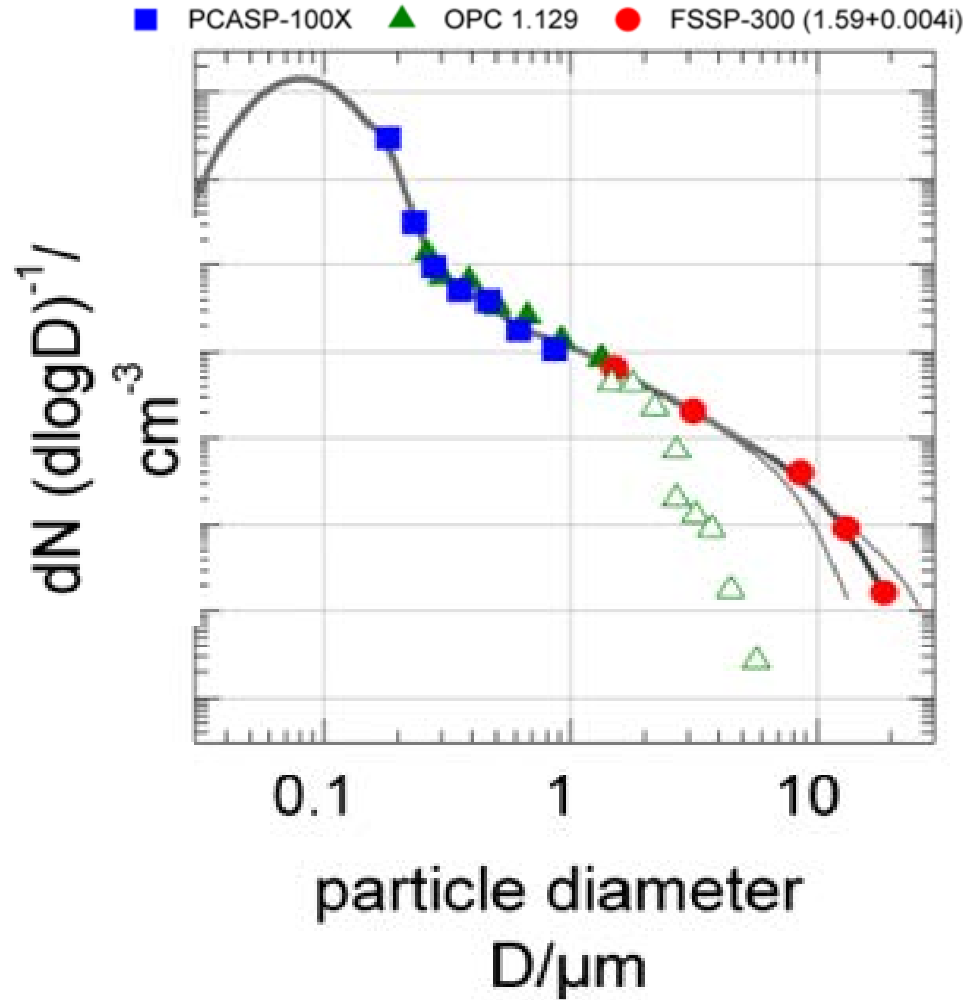


**HASI**

HALO Aerosol sub-micrometer inlet



# Der Einlass-Effekt – direkt nachgemessen (DLR Falcon)



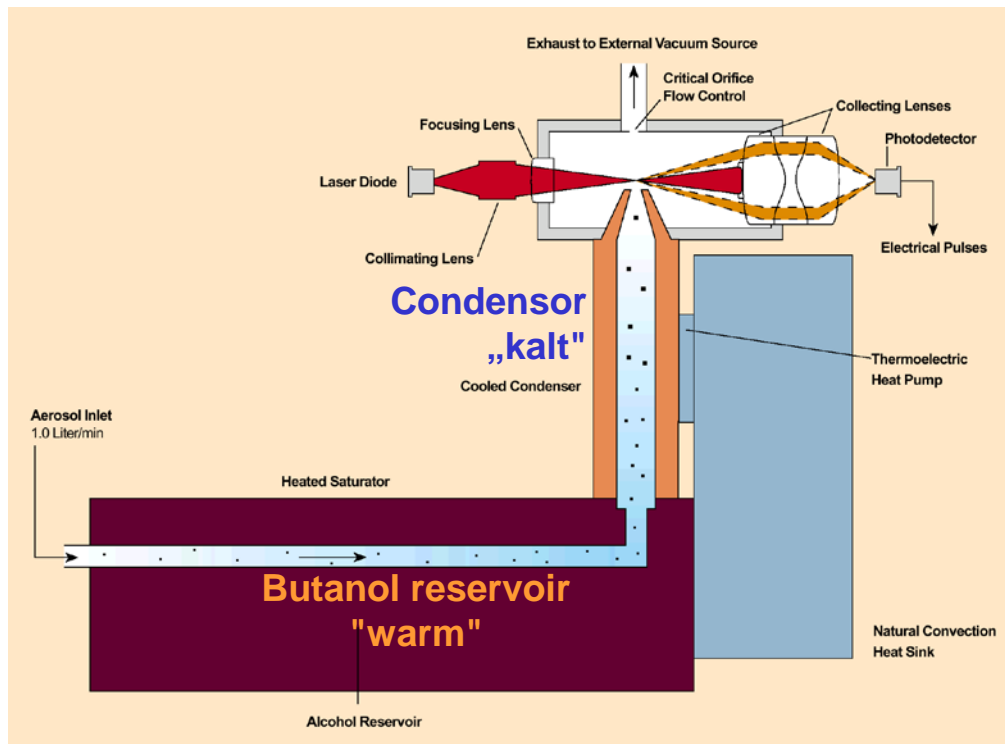
# Messmethode für (ultra-)feine Partikel (< 100 nm)

## CPC (Condensation Particle Counter)

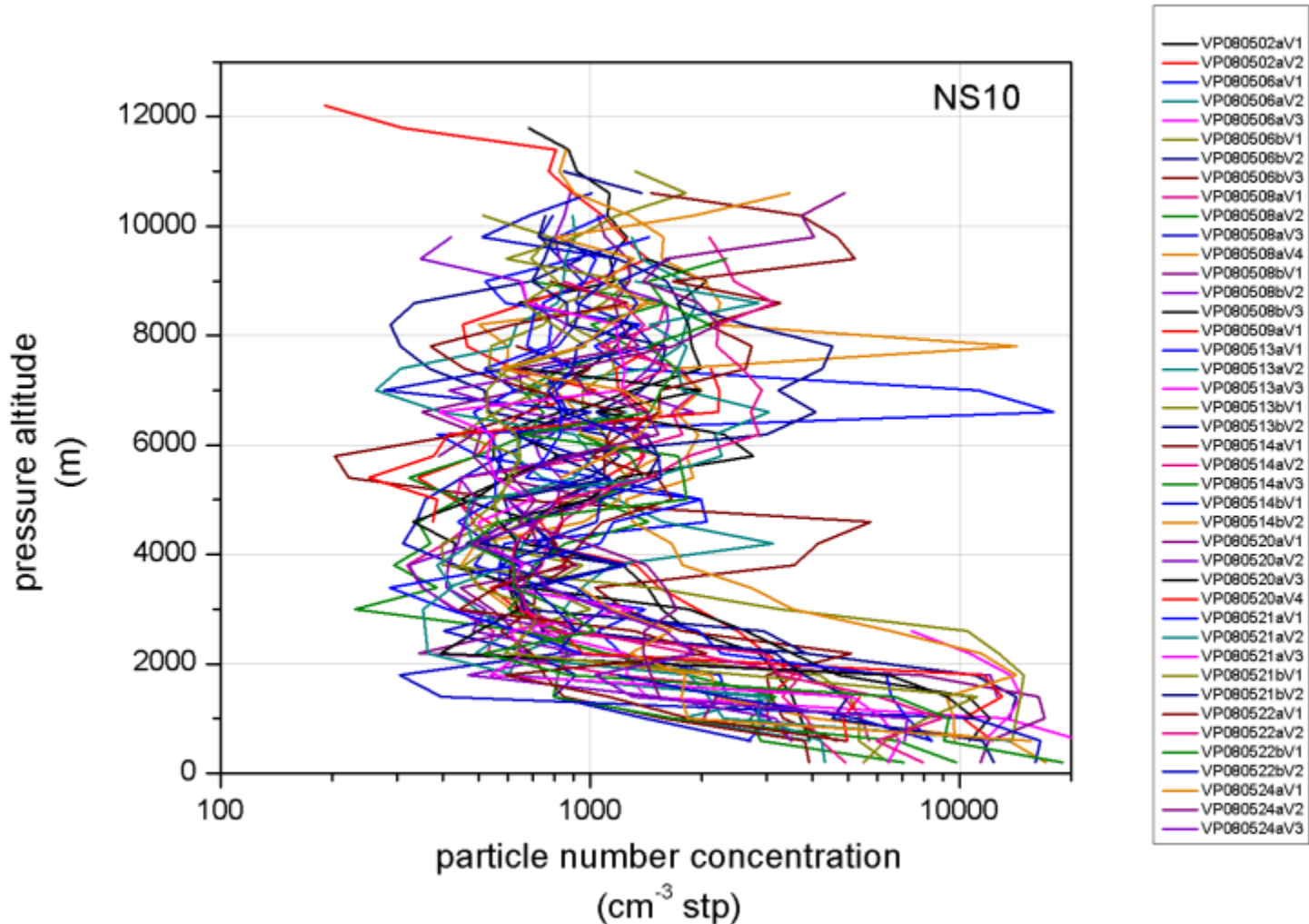


Messung einer integralen Konzentration von Partikeln die größer als der untere Grenzdurchmesser sind (z.B. 10 nm)

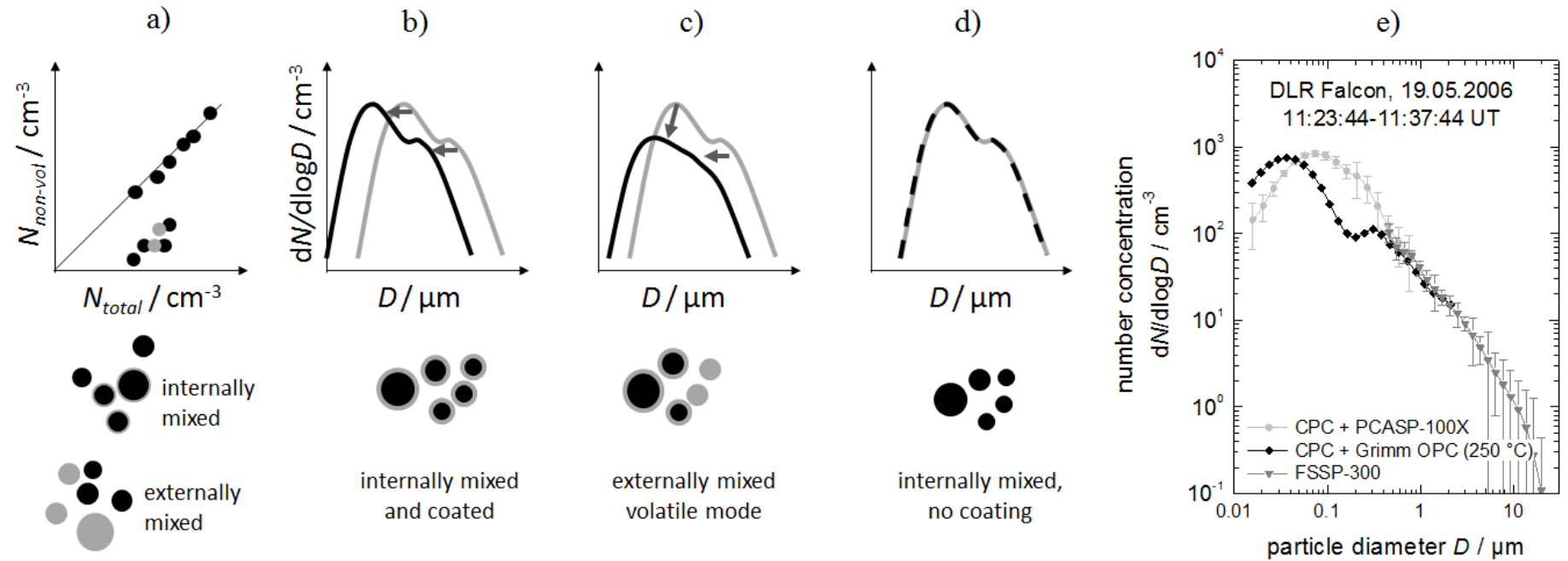
CN = condensation nuclei



# Variabilität in der vertikalen Verteilung von Feinpartikeln über Europa im Mai 2008



# Der „Mischungszustand“ von Aerosolpartikeln: Vergleich von beheizten und unbeheizten Partikelmessungen



# Messmethoden für „größere“ Partikel (>100 nm) (mit optischer Detektierbarkeit)

Optische Partikelzähler  
Optische Aerosolspektrometer



Größenbereich 0.1-100  $\mu\text{m}$   
(aber nicht mit nur einem  
Messinstrument)

Prinzip: Messung von Streulicht



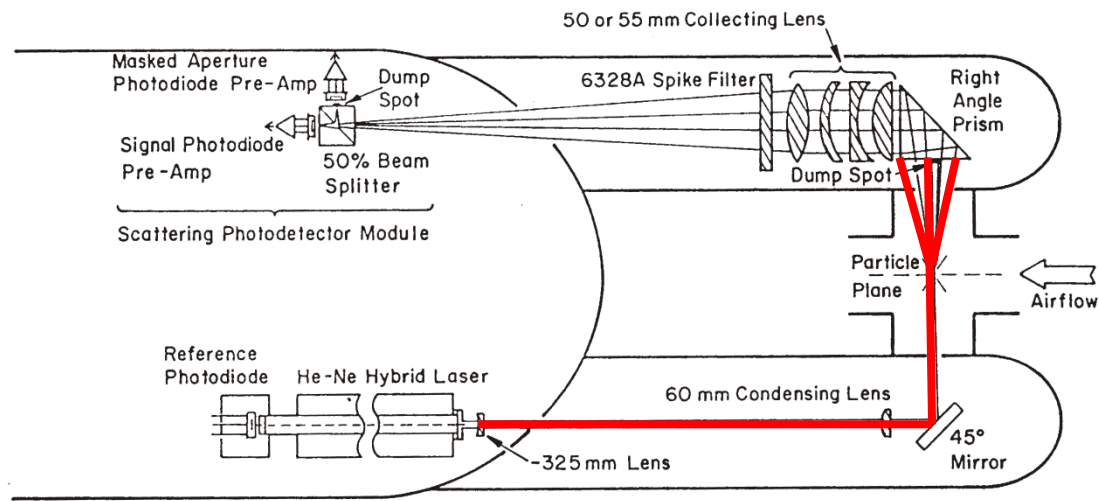


# Beispiel: FSSP-300

„Forward Scattering Spectrometer Probe“

Größenbereich = 0.3 - 20  $\mu\text{m}$

Messung einzelner Partikel

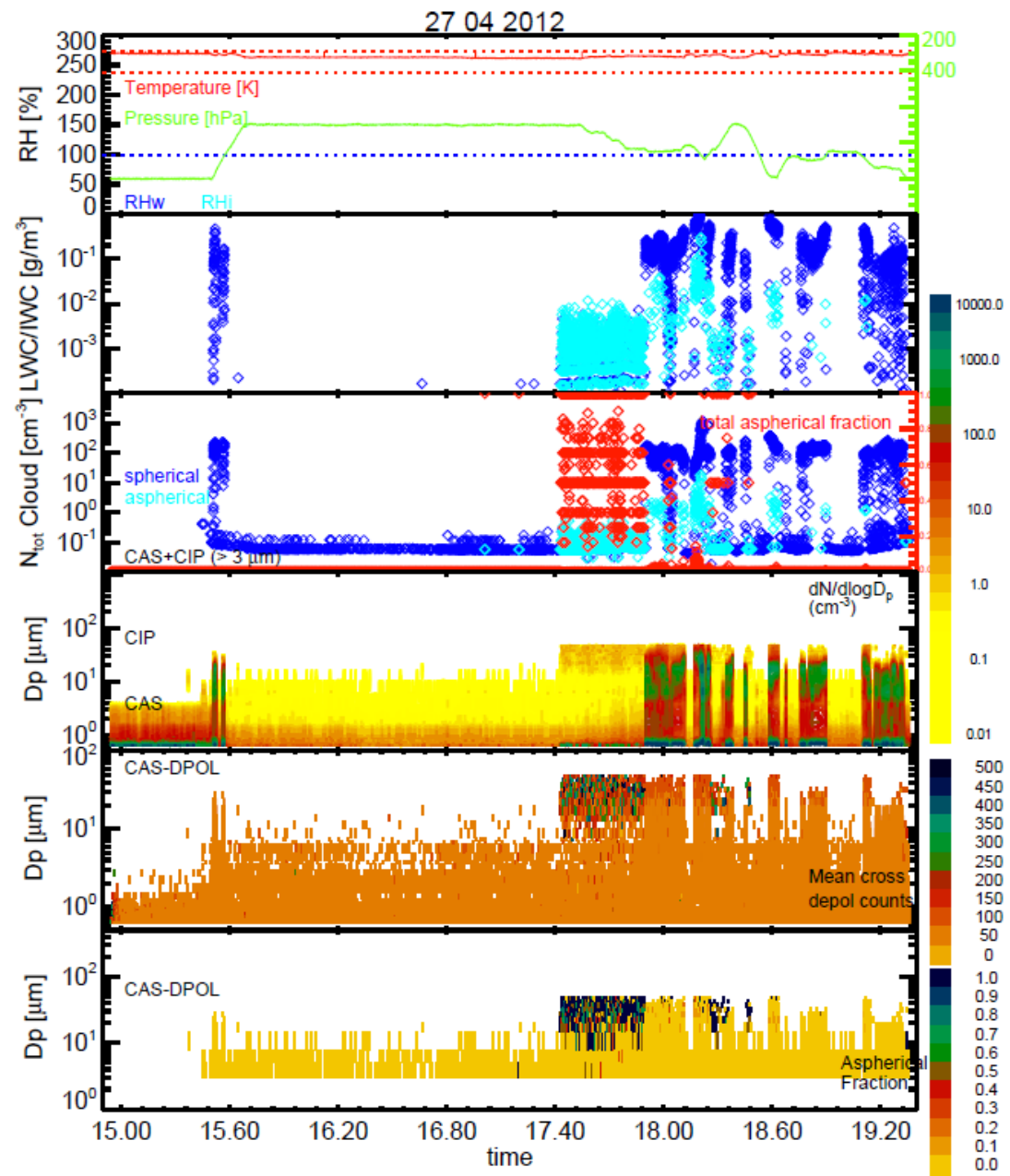




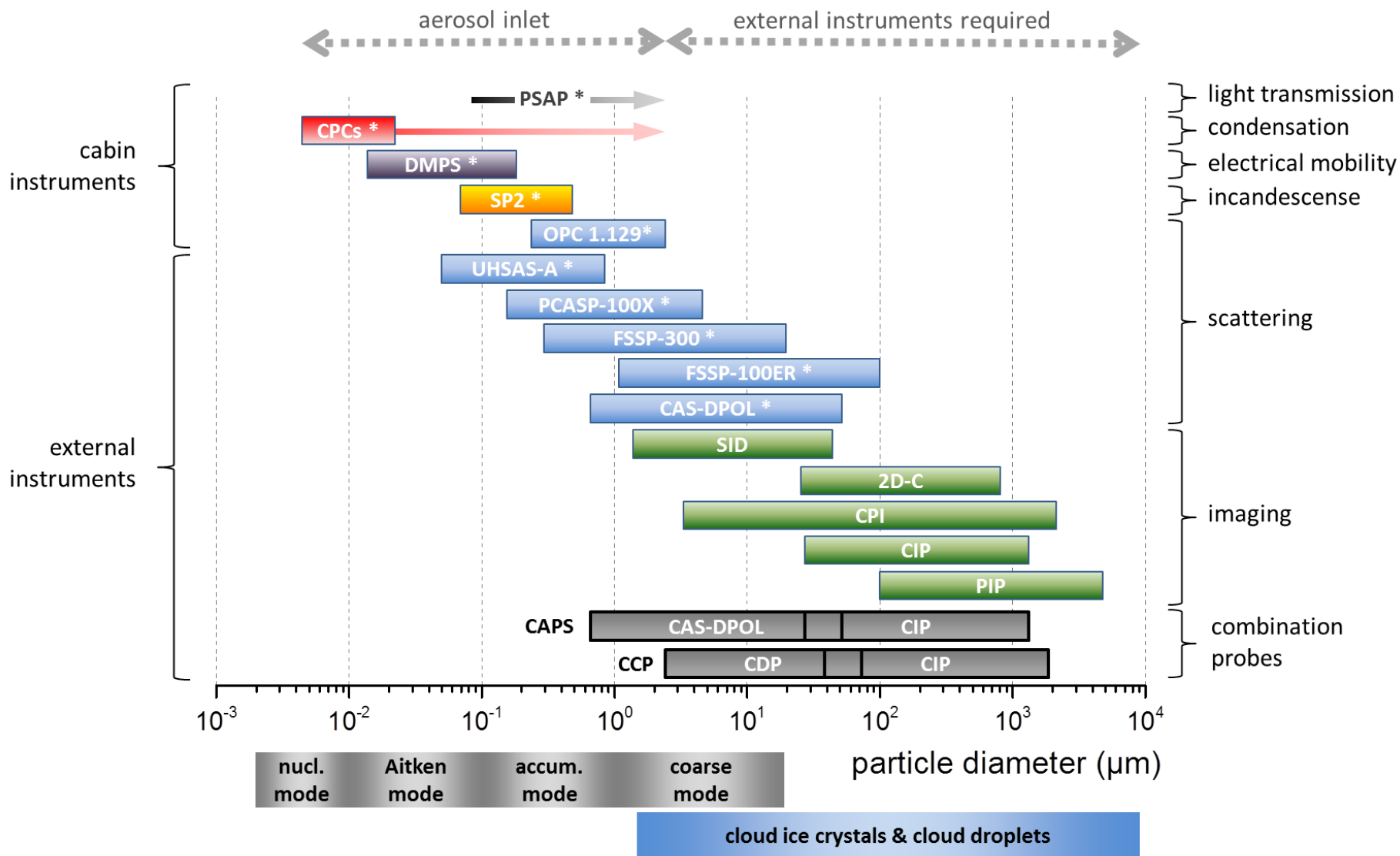


**Messbeispiel:  
Cloud & Aerosol Spectrometer  
with detection of polarization  
(CAS-DPOL)**

**Einflug in tiefe Bewölkung in  
der kanadischen Arktis**



# Die Kombination vieler Messmethoden ist wichtig ...



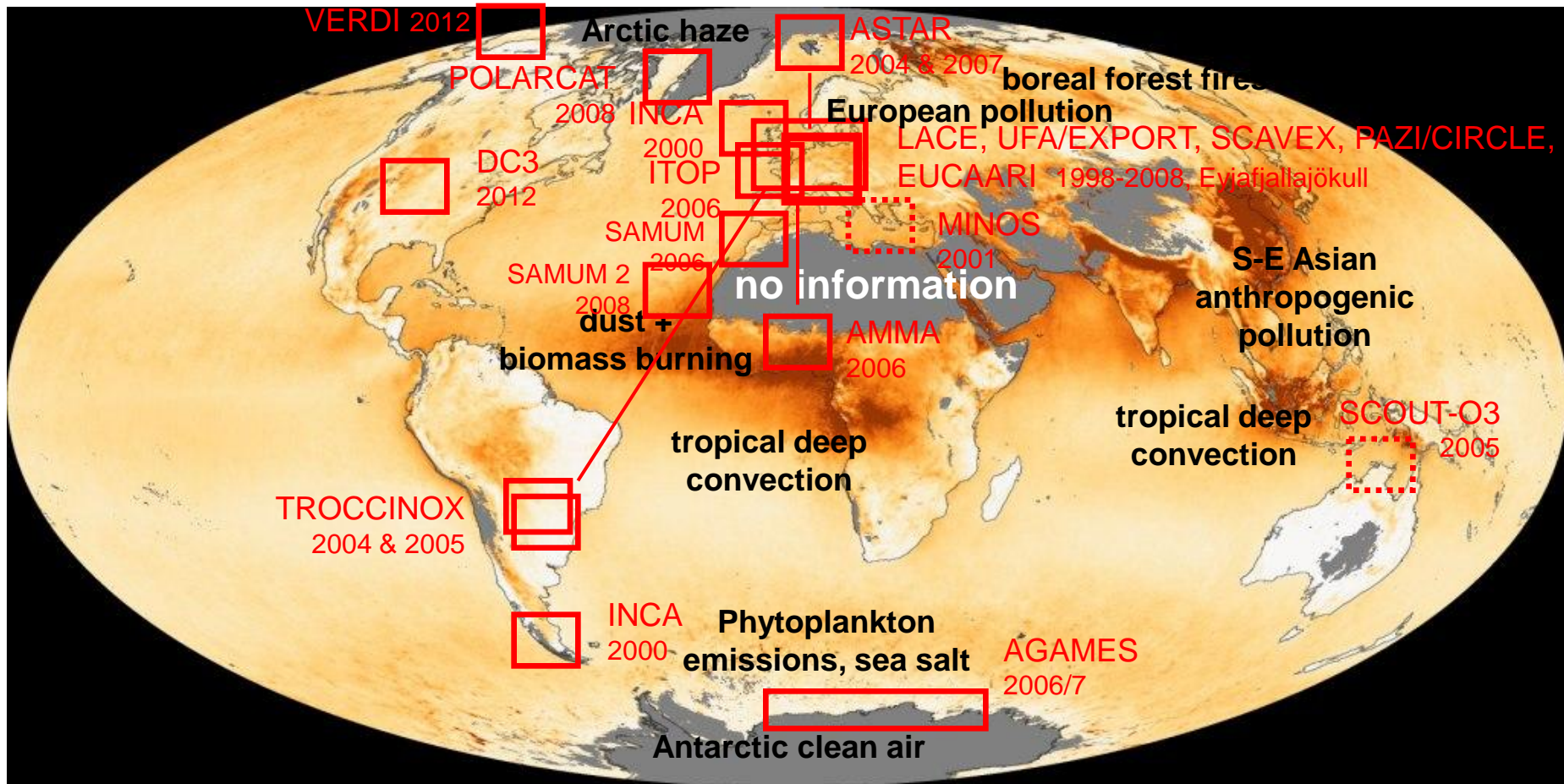
**Nanometer**

**Mikrometer**

**Millimeter**



# Flugzeug-Messprojekte der letzten Jahre mit Beteiligung von DLR Aerosolinstrumenten



Aerosol Optical Depth [-]



<http://climate.gsfc.nasa.gov/viewImage.php?id=199>  
Image of the Week - February 18, 2007



# Was gehört zu einer Messkampagne?

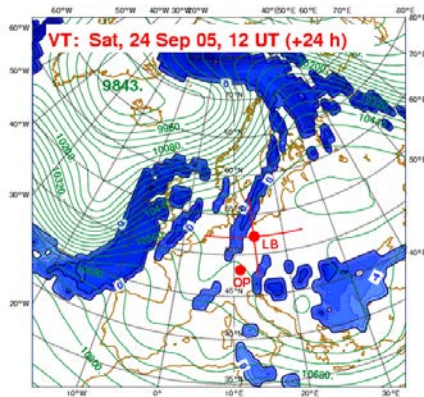
Auswahl der für den Zweck passenden Instrumente



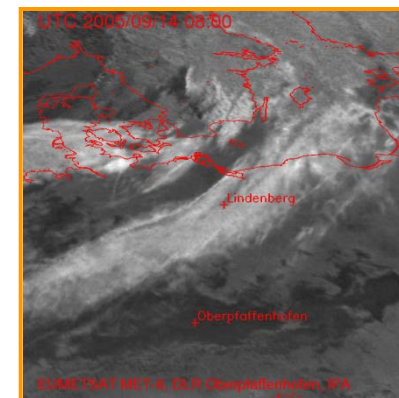
Koordination mit Luftverkehrskontrolle



Vorhersage von „Wetter“



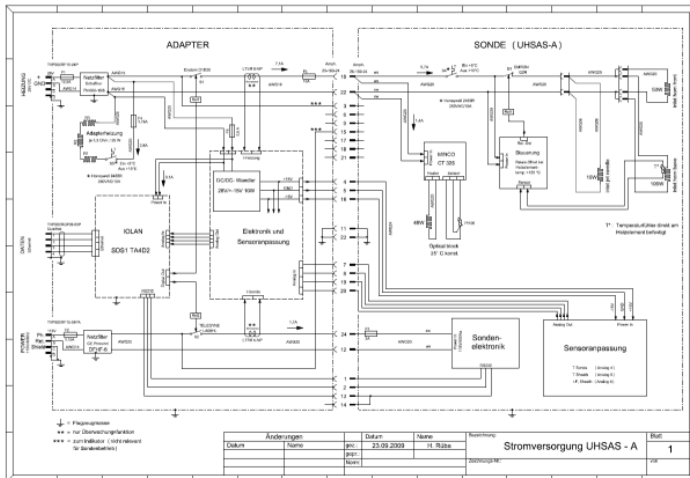
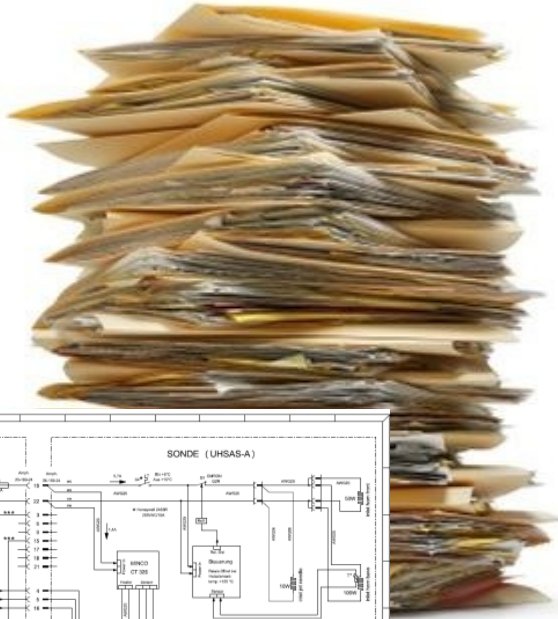
Zeitnahe Informationen zum Flug (z.B. Satellitenbilder)



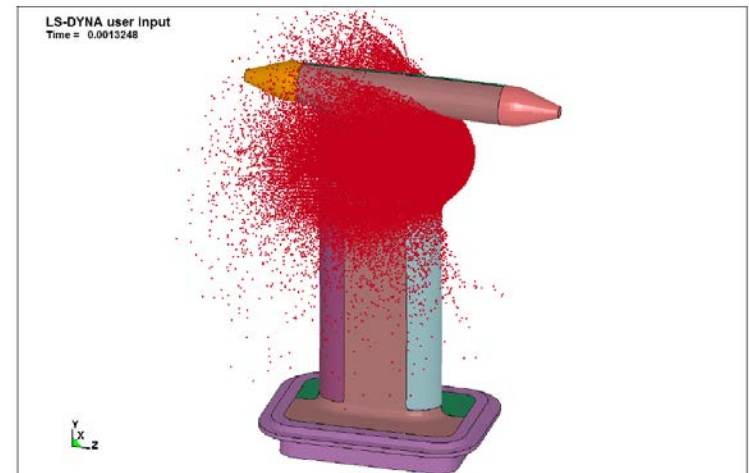
# Und das wirklich Lästige bei dieser Art Arbeit: die Luftfahrtrechtliche Zulassung

Vibrationstests am Boden

Papier und noch mehr Papier ...



Analyse von Vogelschlag





# Inhaltsübersicht

## → **Aerosolpartikel in der Atmosphäre**

Woher stammen die Aerosole?

Wo in der Atmosphäre treten sie auf?

Welche Eigenschaften?

Welche Auswirkungen, insbesondere auf das Klima?

## → **Messungen mit Forschungsflugzeugen**

Falcon, HALO und andere Forschungsflugzeuge

Wie kann man vom Flugzeug aus messen?

Welche Einsatzgebiete?

## → **Beispiele von Forschungsprojekten**

Verschmutzung in der Arktis

Gewitter

Vulkanasche



# Messungen der Emissionen von Schiffen und Flugzeugen



**Lufthansa**  
Die Unternehmensgruppe

Hier sehen Sie, wie wir  
hinter den Emissionen her sind.

Ein interessanter Ausblick aus dem Cockpit des DLR-Forschungsflugzeuges „Falcon“ auf eine Lufthansa Boeing 737-300.

Wie können wir das Fliegen umweltverträglicher machen? Nur in enger Zusammenarbeit mit Wissenschaft und Forschung, die uns einen genauen Kenntnisstand über die Auswirkungen des Luftverkehrs auf Atmosphäre und Klima vermitteln. Neue wissenschaftliche Erkenntnisse sind die wichtigste Voraussetzung für mehr Umweltsorge.

Deshalb unterstützt Lufthansa eine Vielzahl von Projekten, etwa des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR). Bei einem Forschungsvorhaben des DLR geht es um die Abhängigkeiten von unterschiedlichen Schwefelgehalten im Treibstoff auf die Kondensstreifenbildung. Das Messflugzeug des DLR setzt sich dabei dicht hinter die extra zu diesem Zweck eingesetzte Boeing 737. Wichtige Daten für umfangreiche Klimamodellsimulationen werden so gewonnen. Mehr darüber im Lufthansa Umweltbericht.

**Balance**

Wollen Sie mehr über unsere Umweltaktivitäten wissen? Wir senden Ihnen gerne unseren aktuellen Umweltbericht „Balance 1998/99“ zu.

Lufthansa Konzernkommunikation  
Postfach, 60158 Frankfurt  
Telefon/Fax 018 02/32 3130

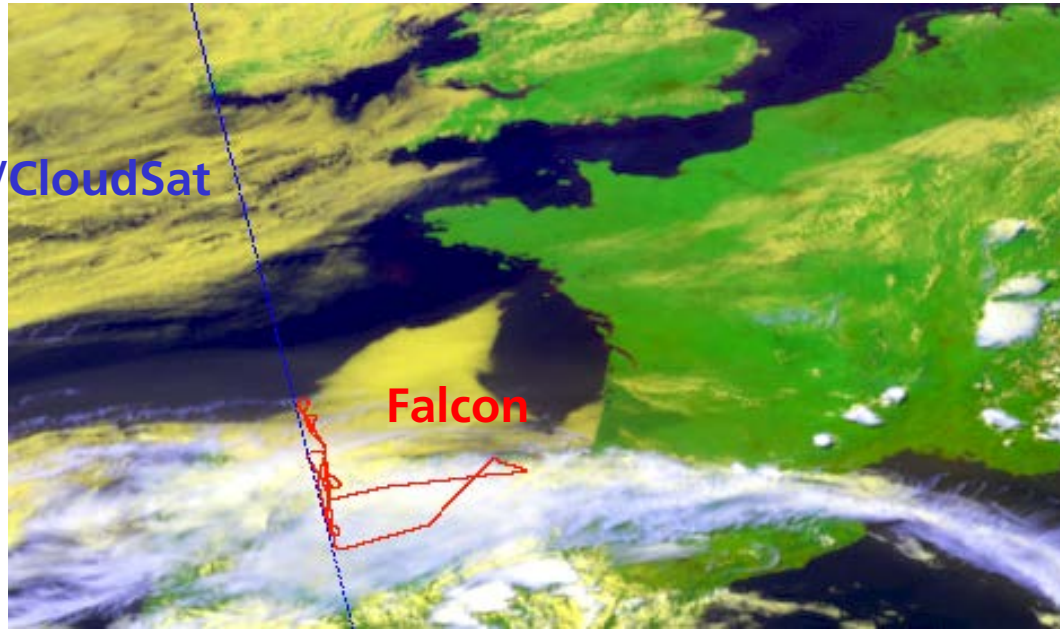
© Fliegung im Anflug



# Satelliten-Validierung bei CIRCLE-2: In-situ-Messungen in Zirren koordiniert mit Calipso/CloudSat-Überflug

23.05.2007, 13:39 UT overpass, über Nord-Spanien

Calipso/CloudSat



Longyearbyen, Spitzbergen, Arktis, ASTAR-Kampagnen, 2004 & 2007  
→ Verschmutzung in der Arktis („Arctic Haze“)

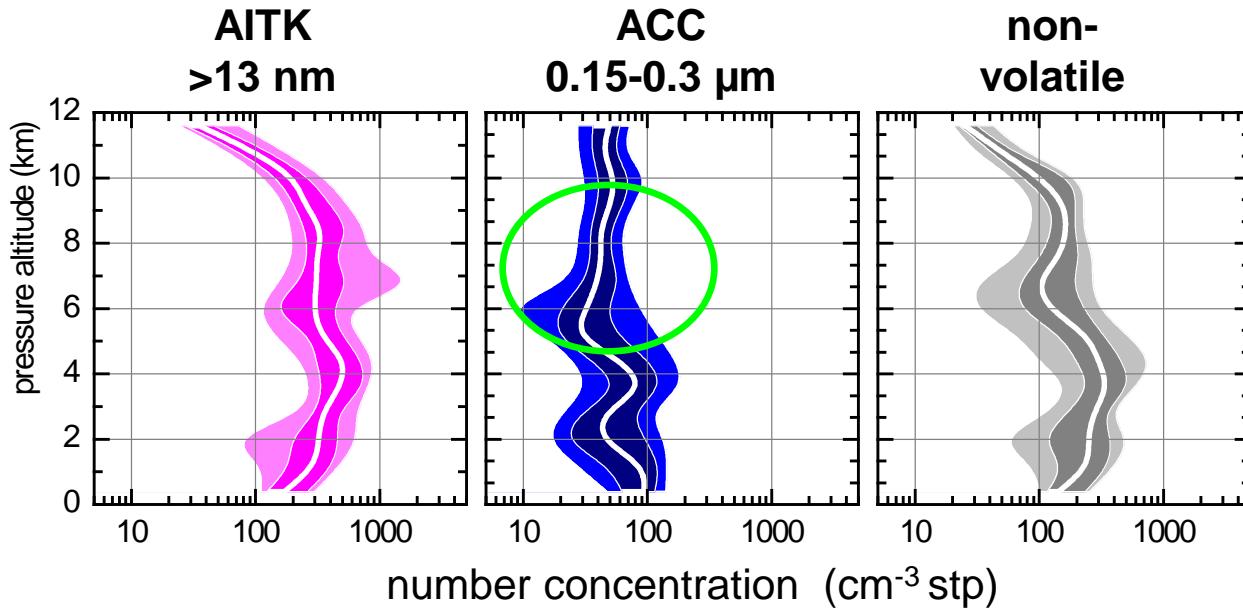


# A comparison with aerosols over central Europe

**ASTAR 2007**

Mar/Apr 2007

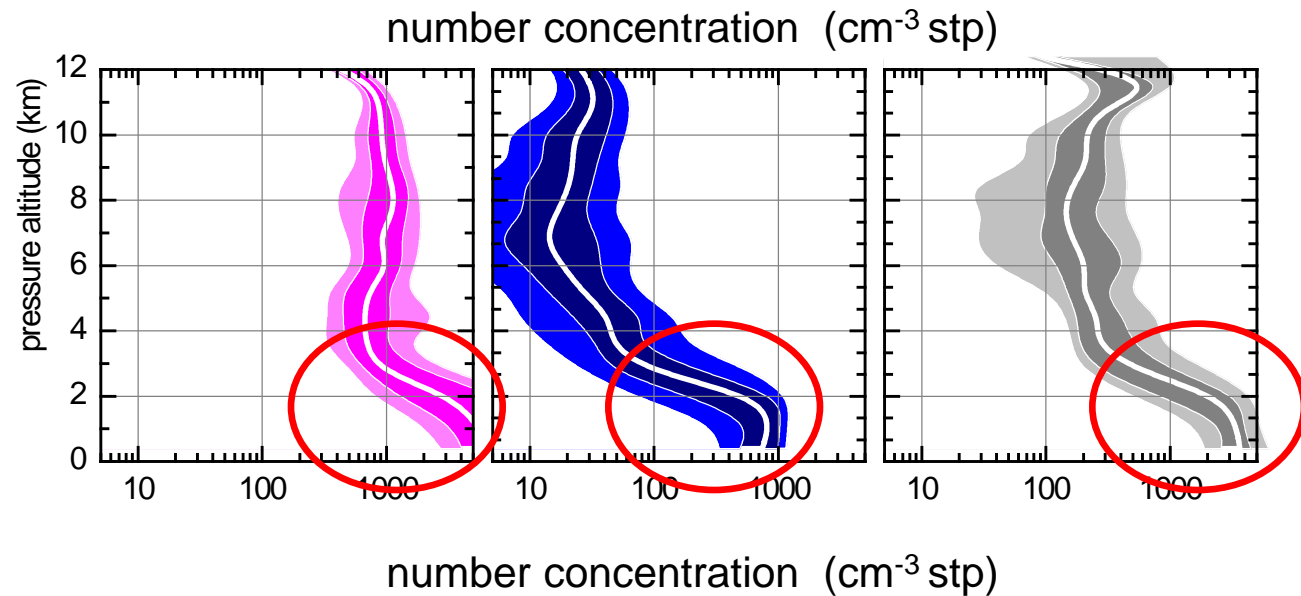
Svalbard



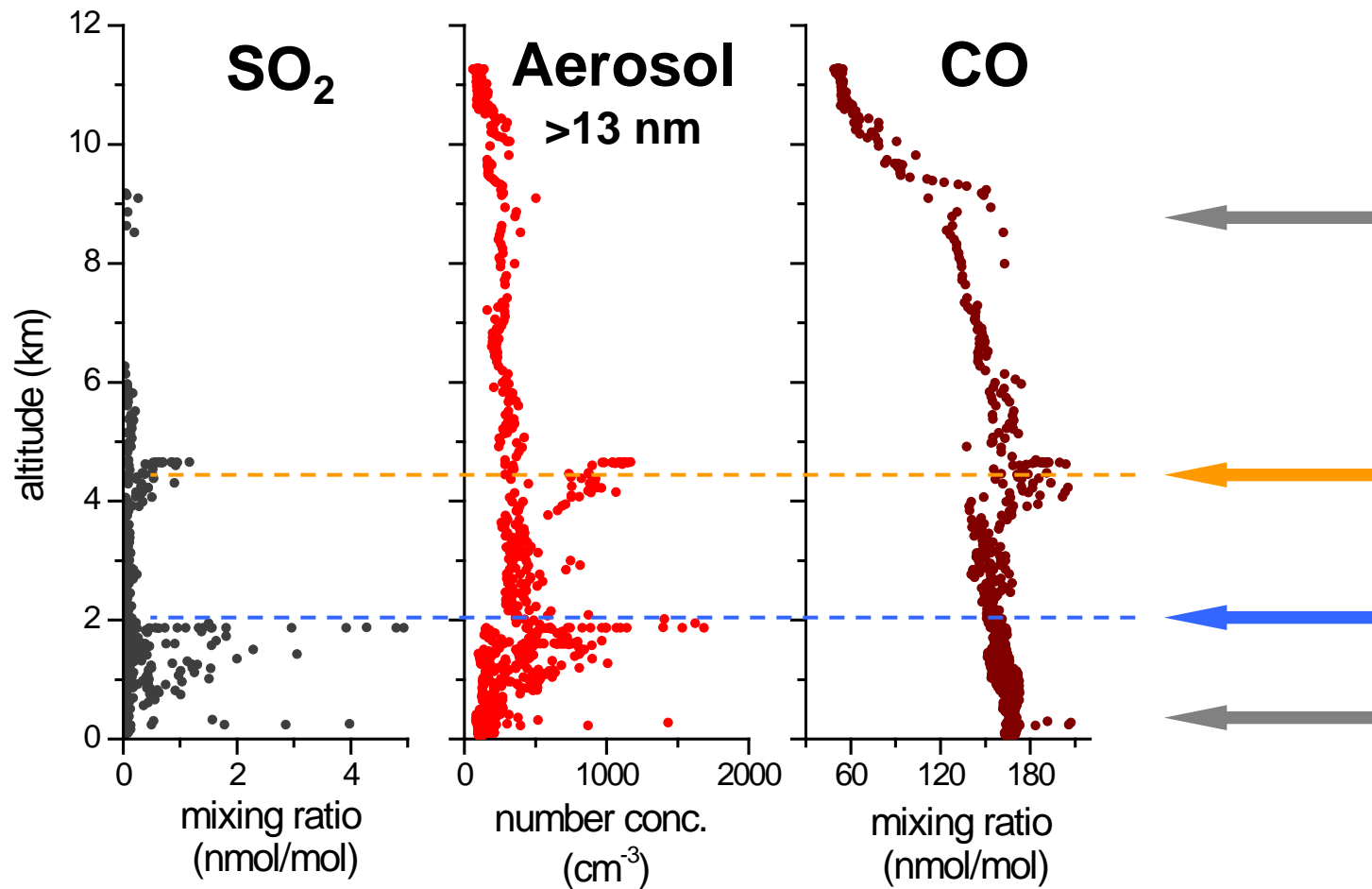
**EUCAARI 2008**

May 2008

Central Europe

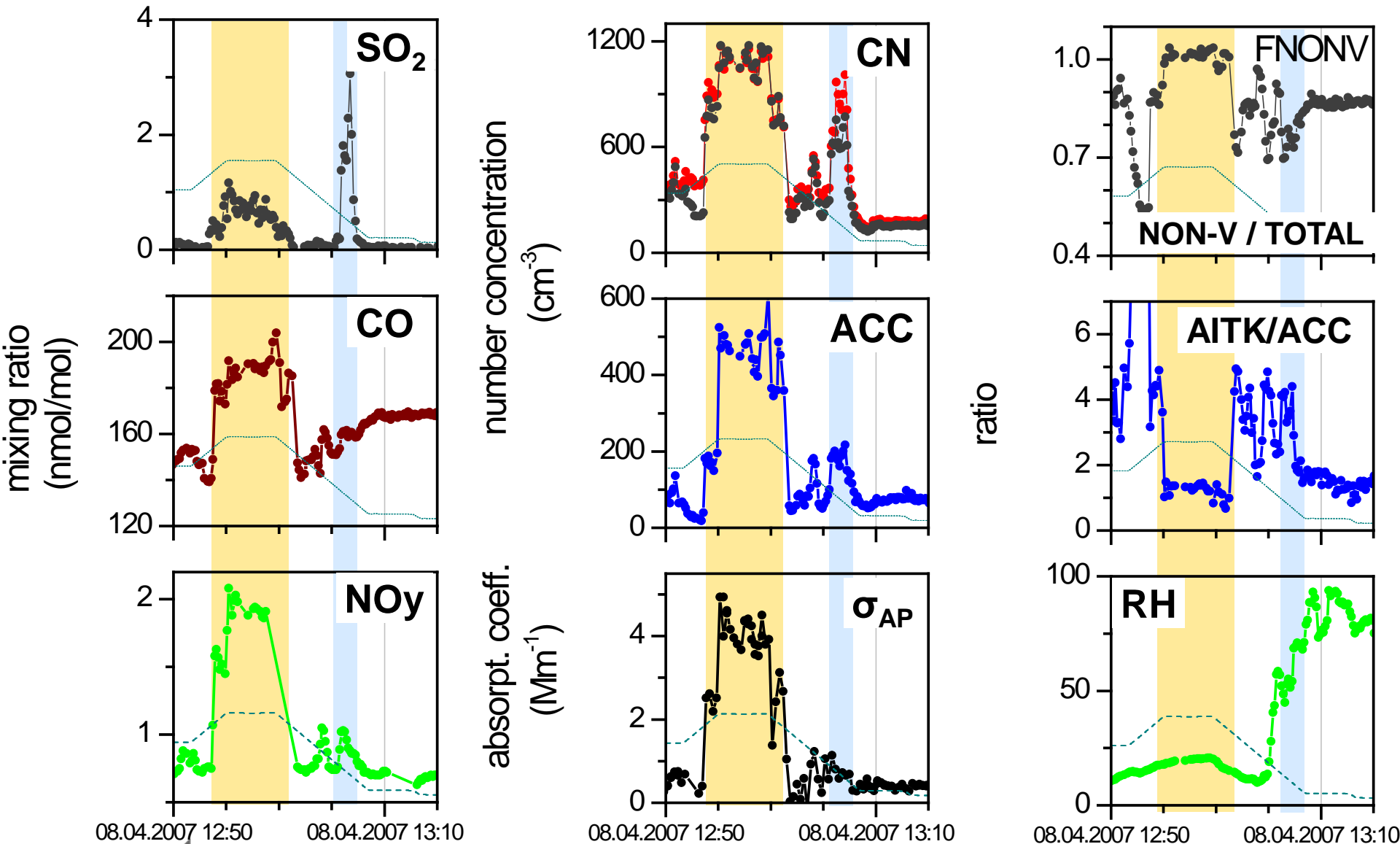


# Observations of pollution layers Flight of 8-April-2007





# Flugsequenzen in 4.5 & 2 km Höhe

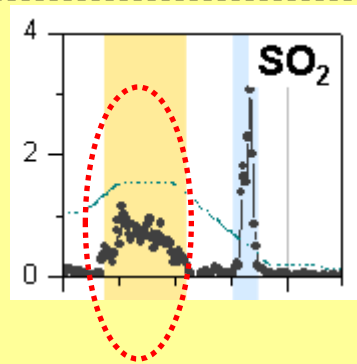




# Verschmutzungsschichten unterscheiden sich in Partikel- und Spurengassignaturen

## Layer A

4.5 km



SO<sub>2</sub> hoch  
CO & NO<sub>y</sub> hoch  
 $[\Delta\text{SO}_2] / [\Delta\text{NO}_y] \approx 1$

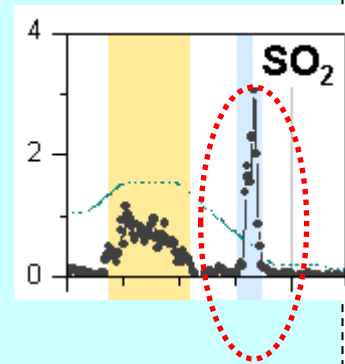
Aitken mode particles high  
All particles have non-volatile core  
Accum. mode dominating

Absorption hoch

➔ Verbrennung

## Layer B

2 km



SO<sub>2</sub> sehr hoch  
CO & NO<sub>y</sub> niedrig  
 $[\Delta\text{SO}_2] / [\Delta\text{NO}_y] \gg 10$

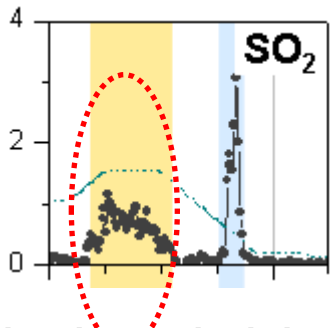
Aitken mode particles high  
Lower non-volatile fraction  
Aitken mode dominating

No significant absorption

➔ Industrie  
(Norilsk, Nickelverhüttung)

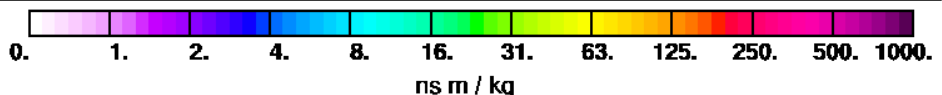
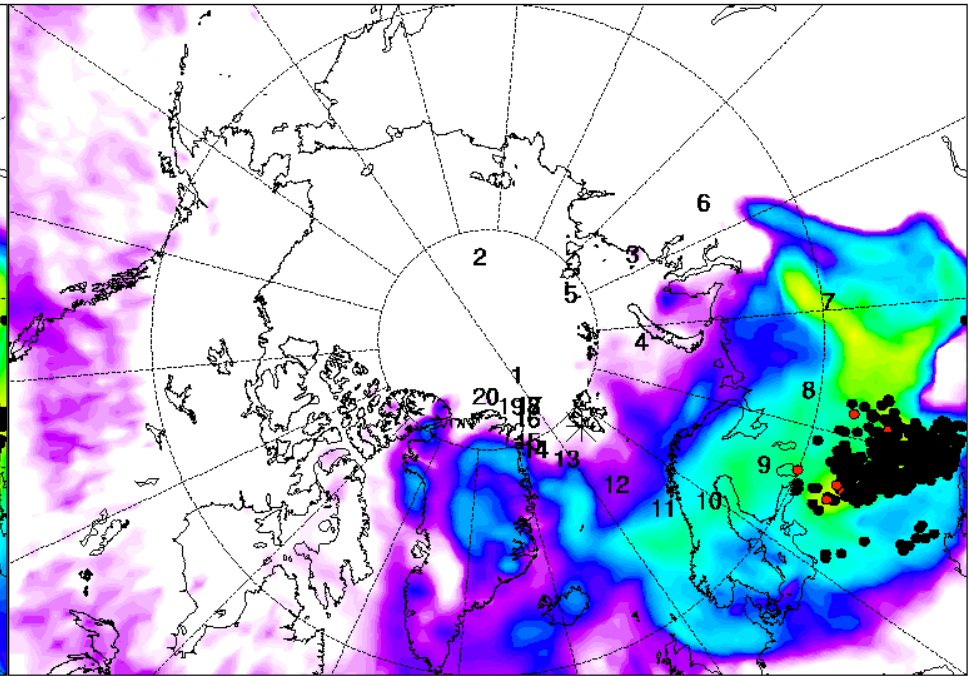
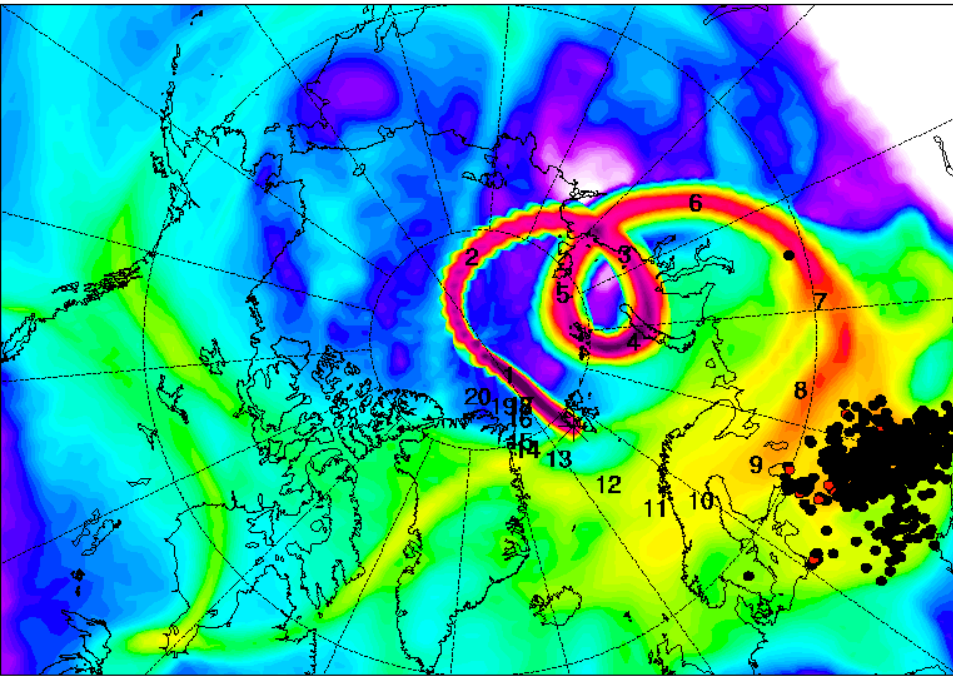


# 8-Apr-2007 / The layer at 4.5 km FLEXPART analysis on air mass origin

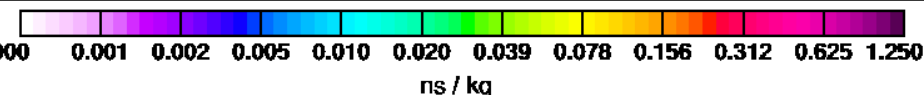


**Column-integrated emission sensitivity in global domain for cmet\_070408a**  
 Start time of sampling 20070408.125445    End time of sampling 20070408.125535  
 Lower release height 575 hPa    Upper release height 566 hPa  
 Meteorological data used are from ECMWF

**Footprint emission sensitivity in global domain for cmet\_070408a**  
 Start time of sampling 20070408.125445    End time of sampling 20070408.125535  
 Lower release height 575 hPa    Upper release height 566 hPa  
 Meteorological data used are from ECMWF



Maximum value 0.681E+04 ns m / kg



Maximum value 0.805E-01 ns / kg





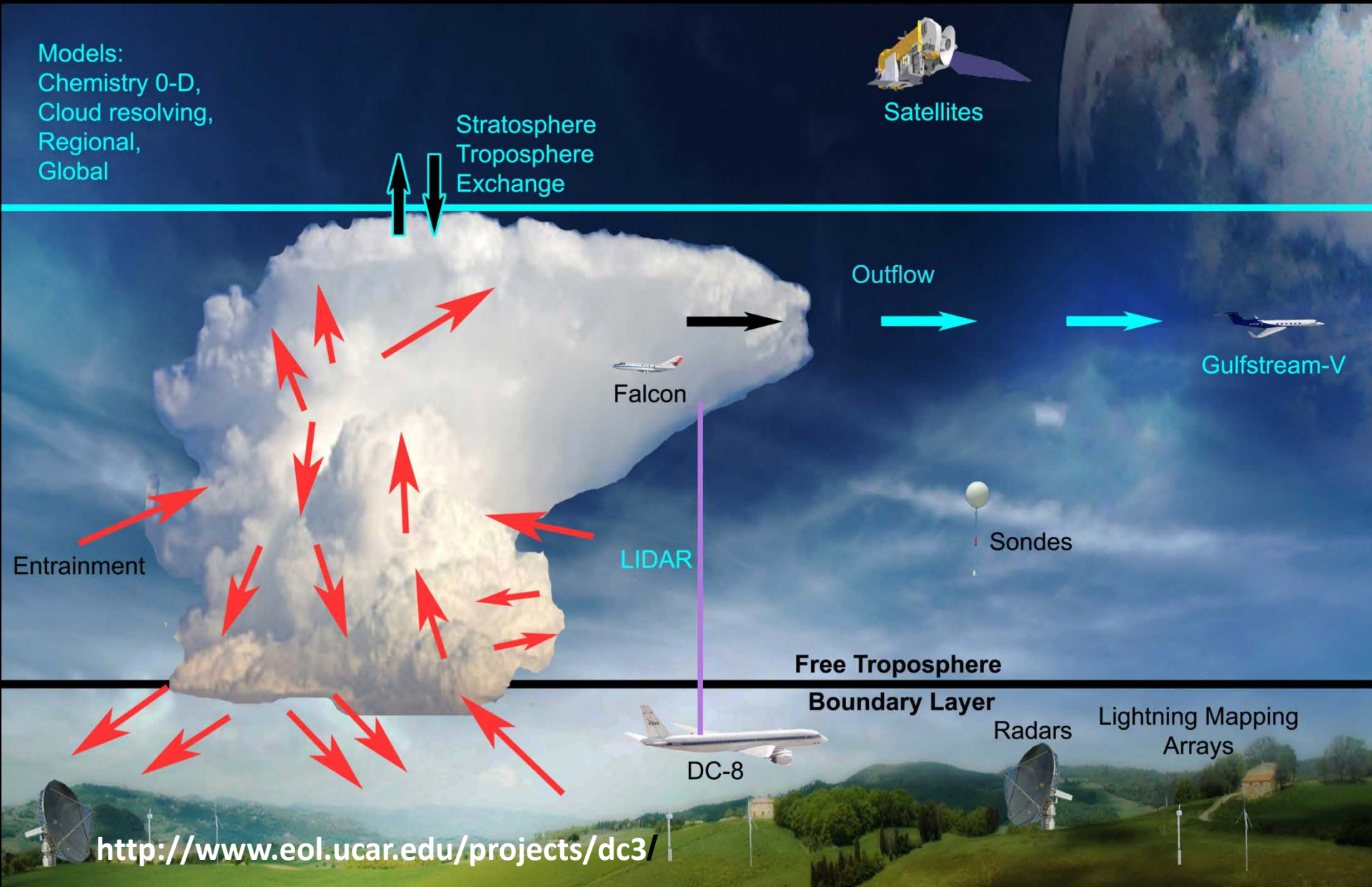
E&O - <http://www.eol.ucar.edu/dc3>

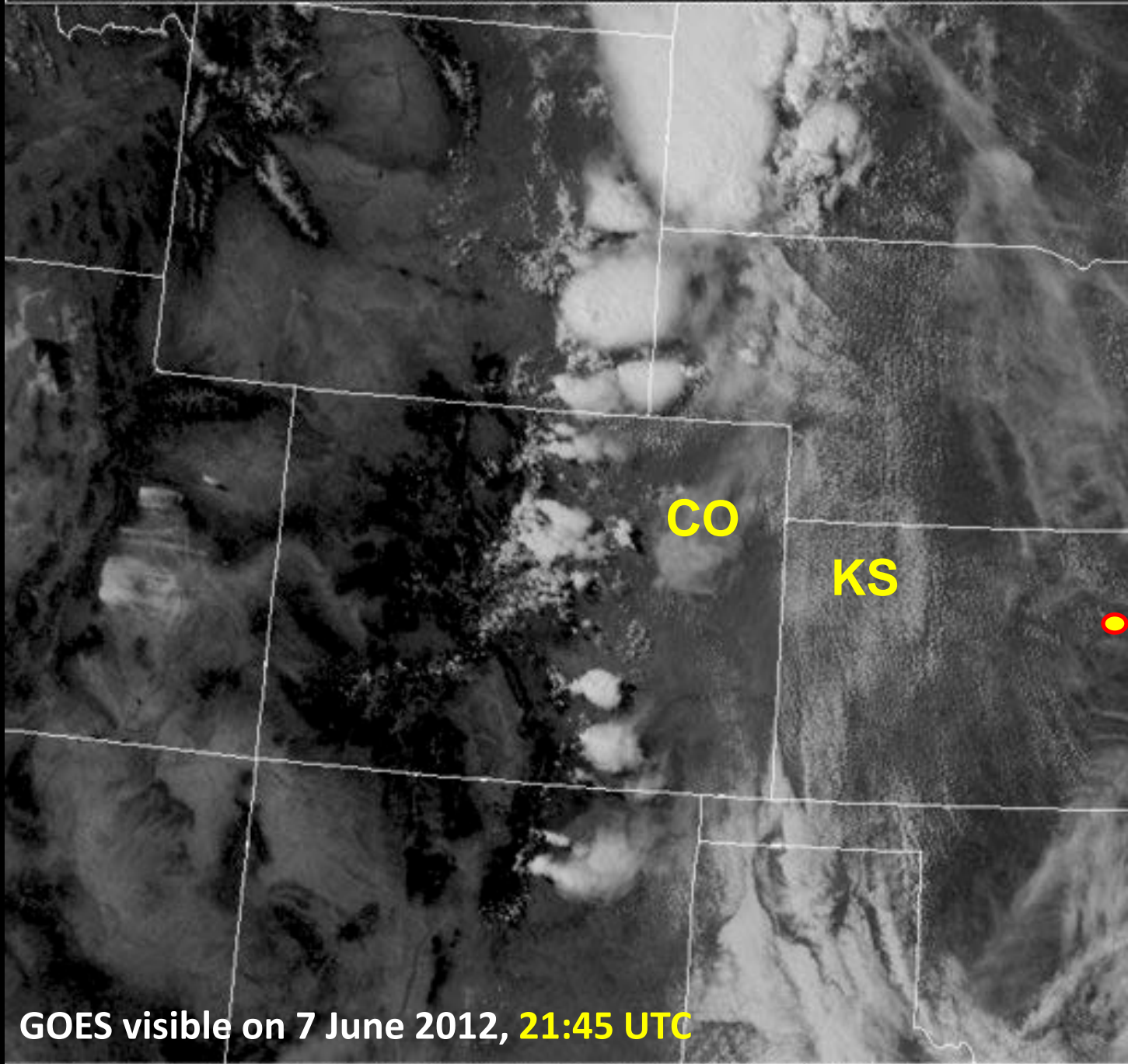


**Hauptziel von DC3: Besseres Verständnis der Rolle von Gewittern beim Transport von Spurengasen und Aerosolen in die obere Troposphäre**



# DC3 field experiment design



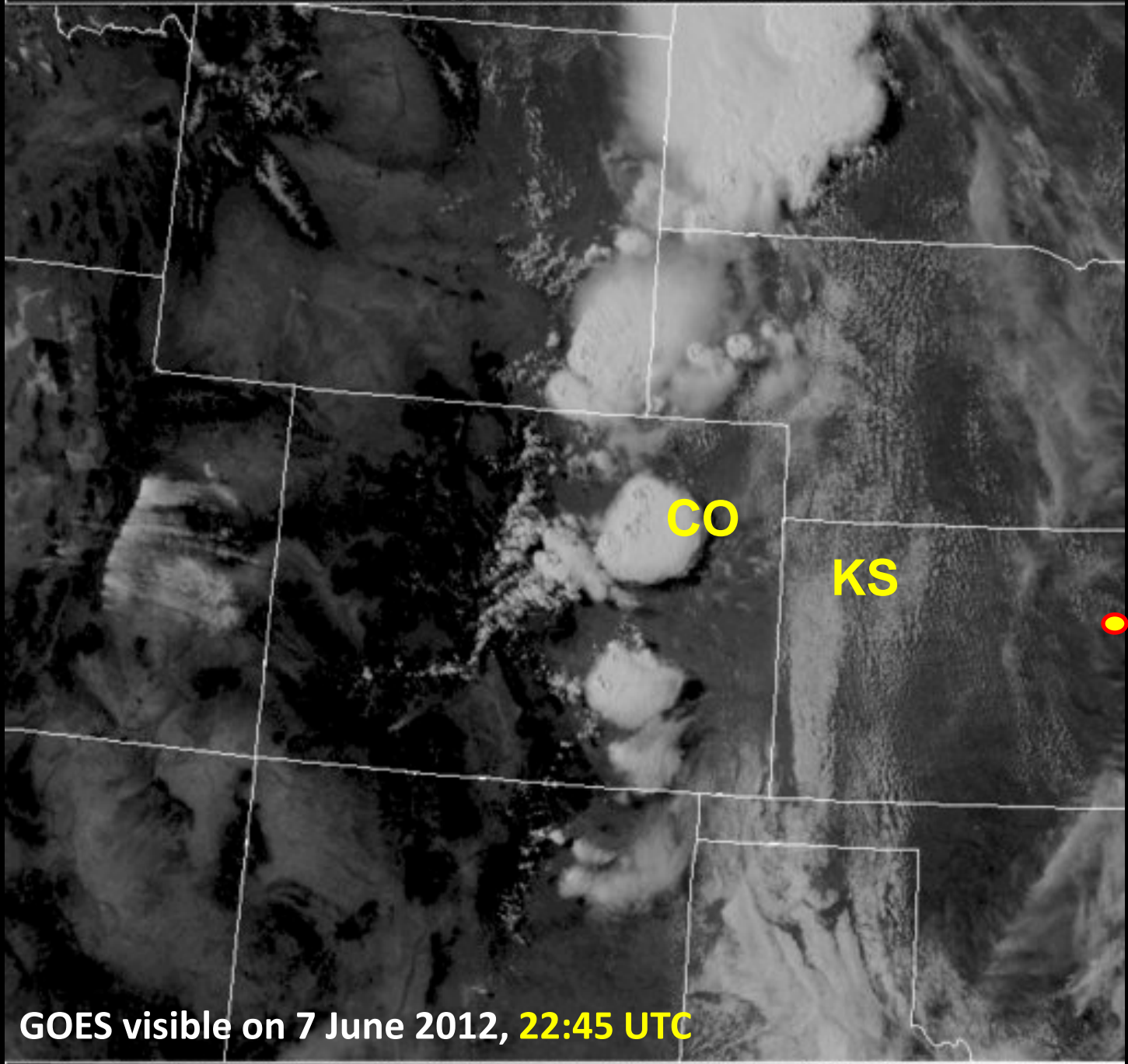


CO

KS

● Salina

GOES visible on 7 June 2012, 21:45 UTC

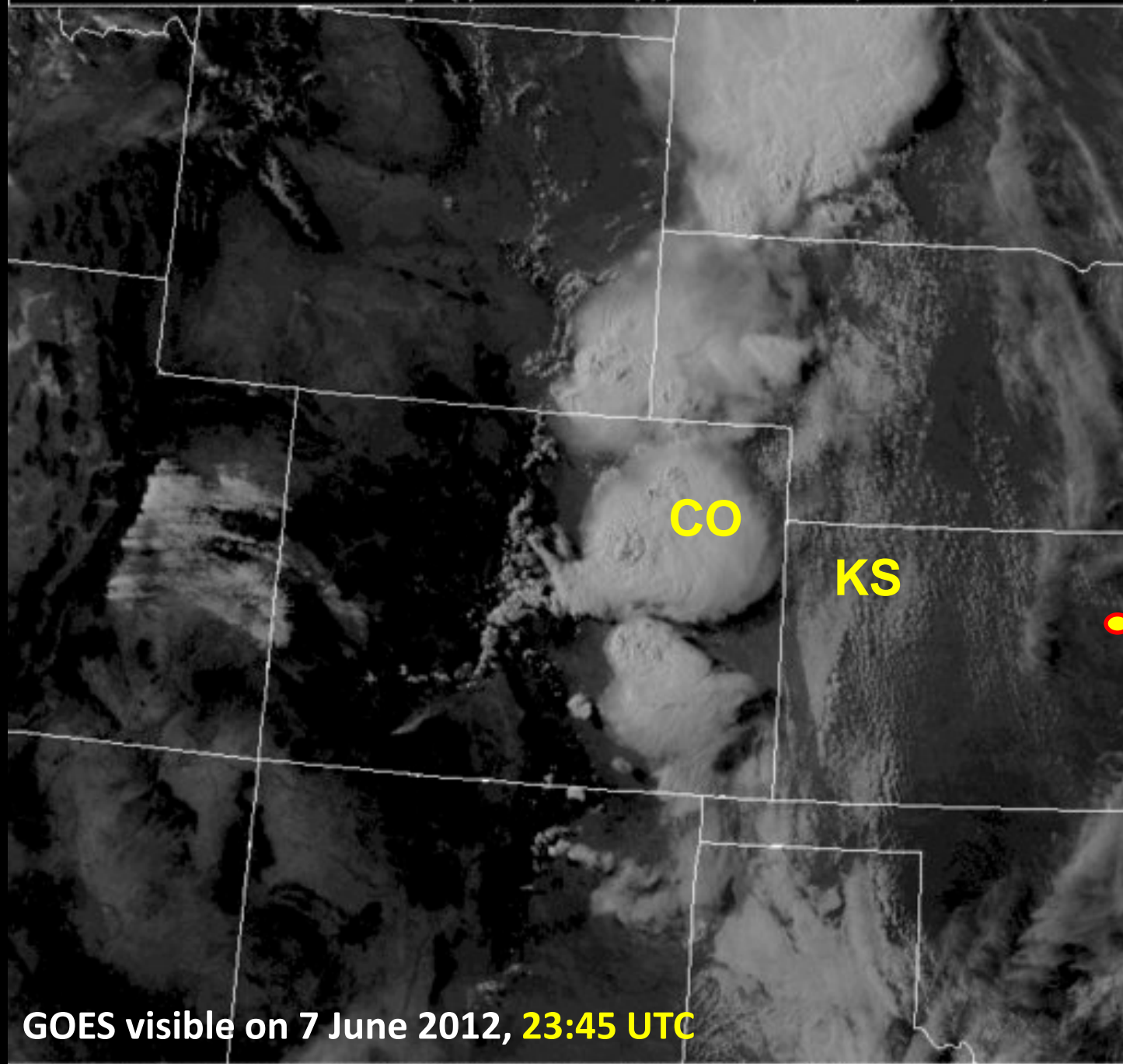


CO

KS

● Salina

GOES visible on 7 June 2012, 22:45 UTC



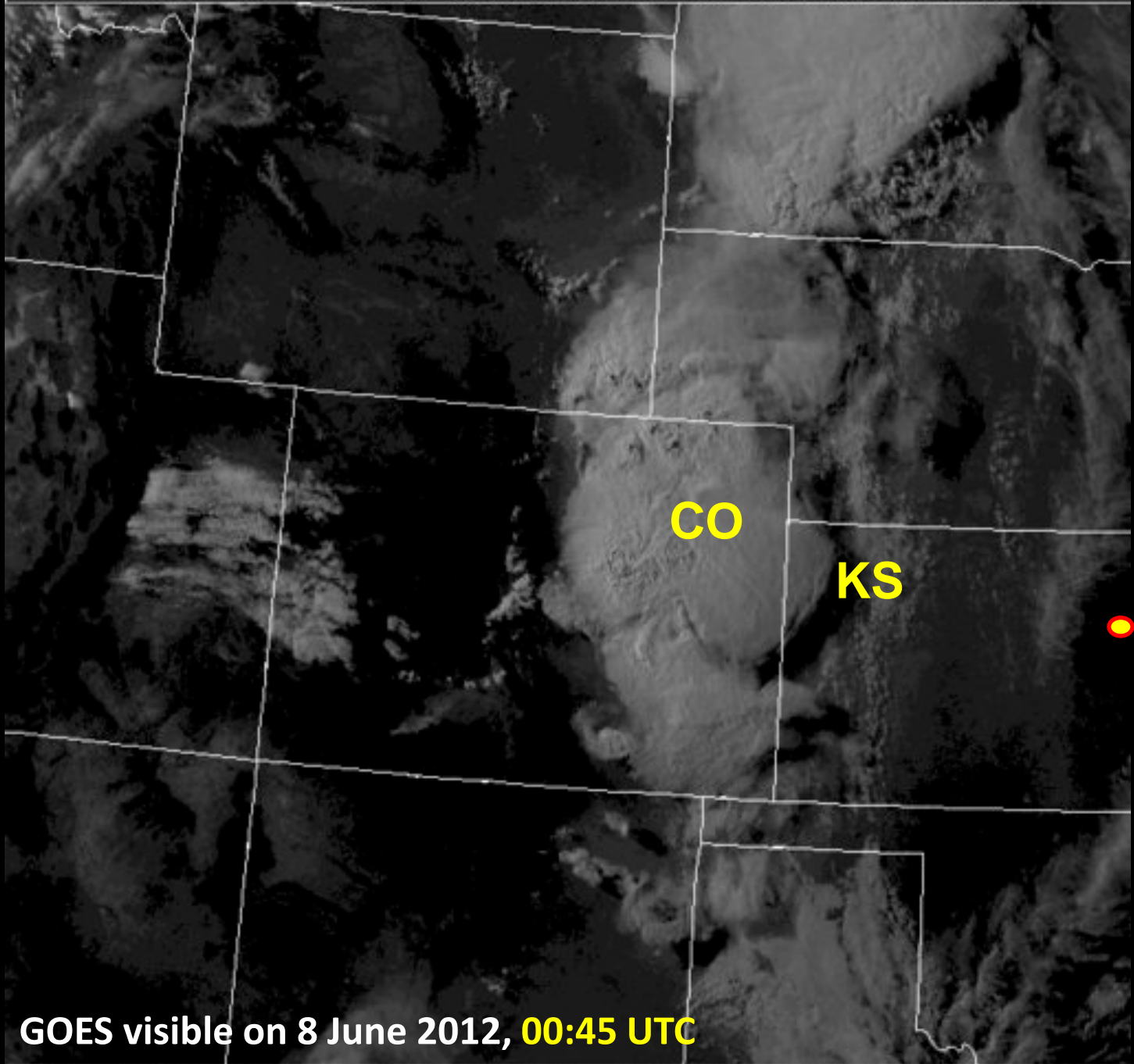
CO

KS

Salina

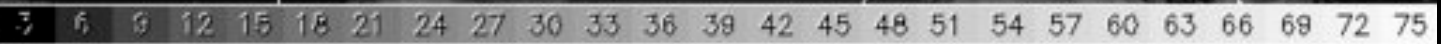
GOES visible on 7 June 2012, 23:45 UTC





● Salina

GOES visible on 8 June 2012, 00:45 UTC

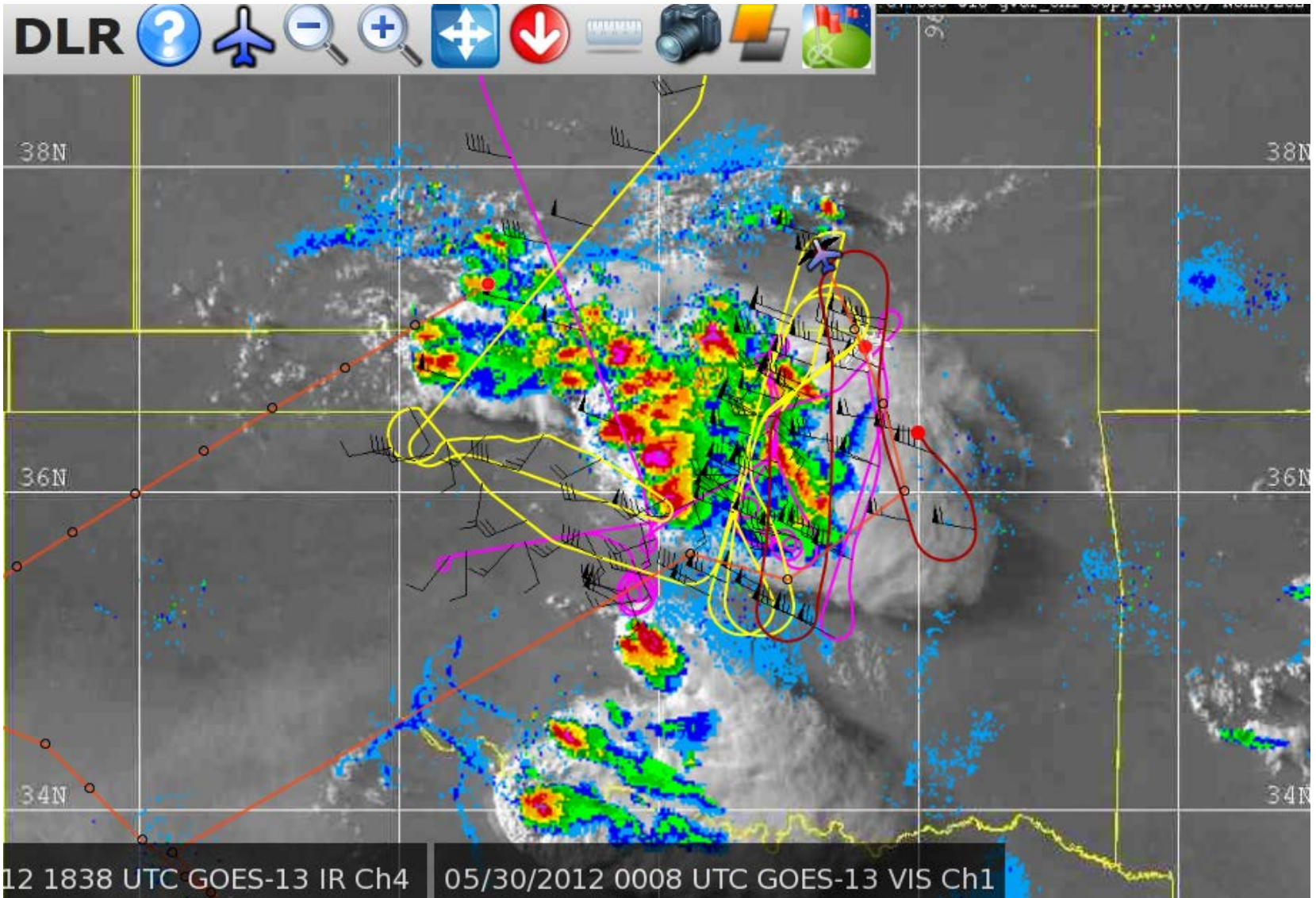




© Chad Cowan  
TVNweather.com



[www.weather-photos.net](http://www.weather-photos.net)  
© 2012 Marko Korošec

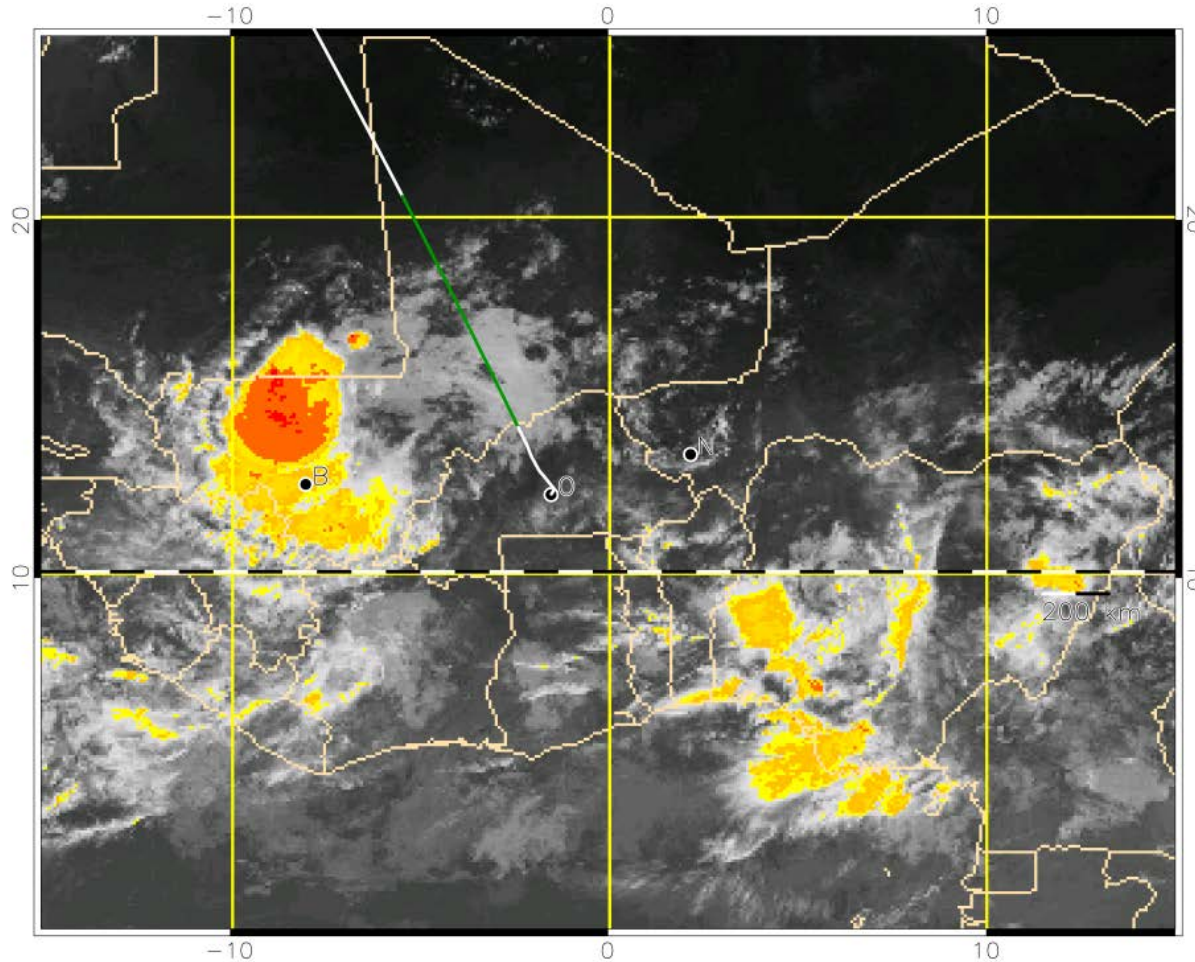




# MSG Satellitenbild und Flugweg 01.08.2006

Meteosat IR 10.8

01. August 2006 10:30 UTC

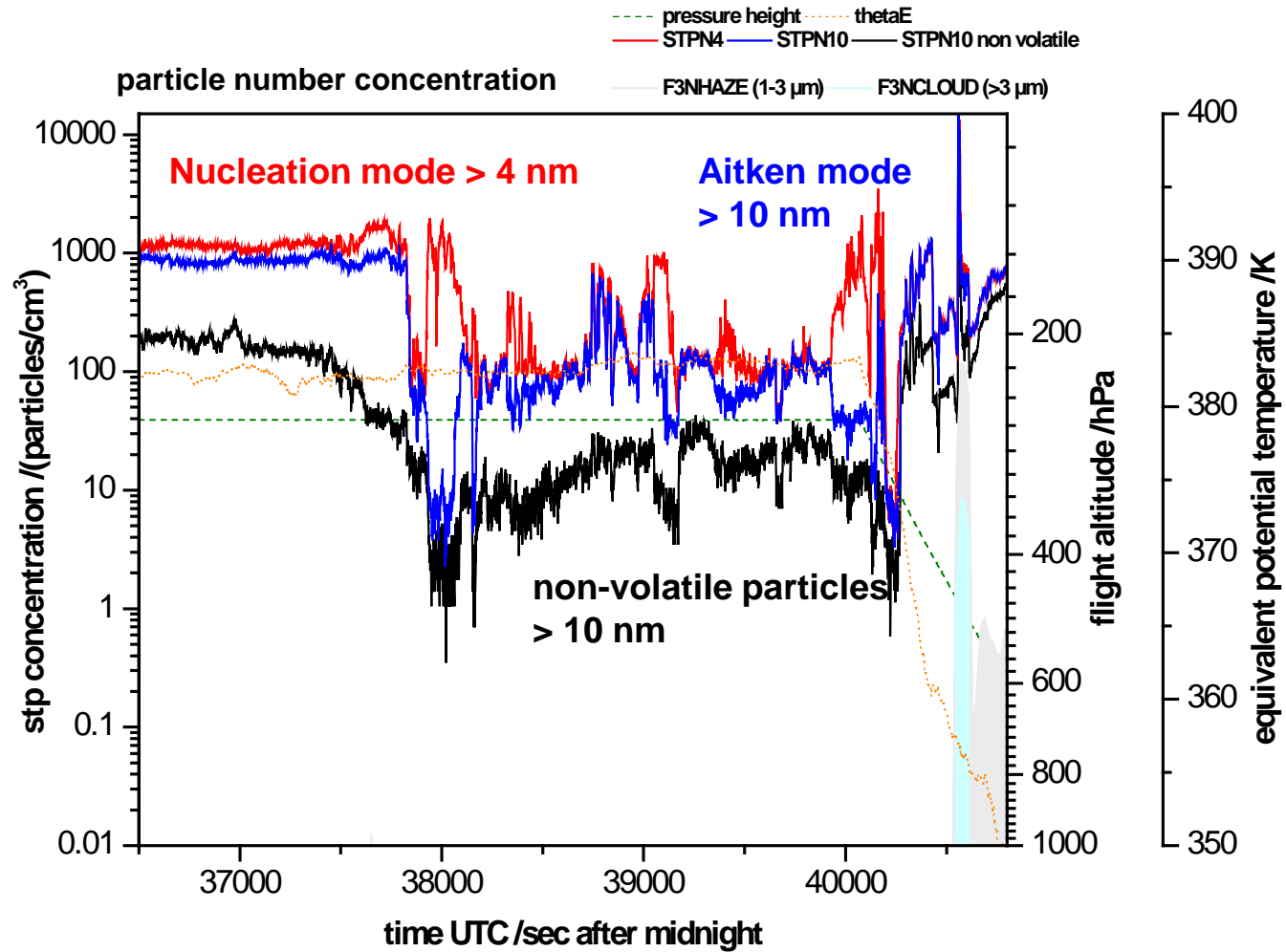


— Flugsequenz

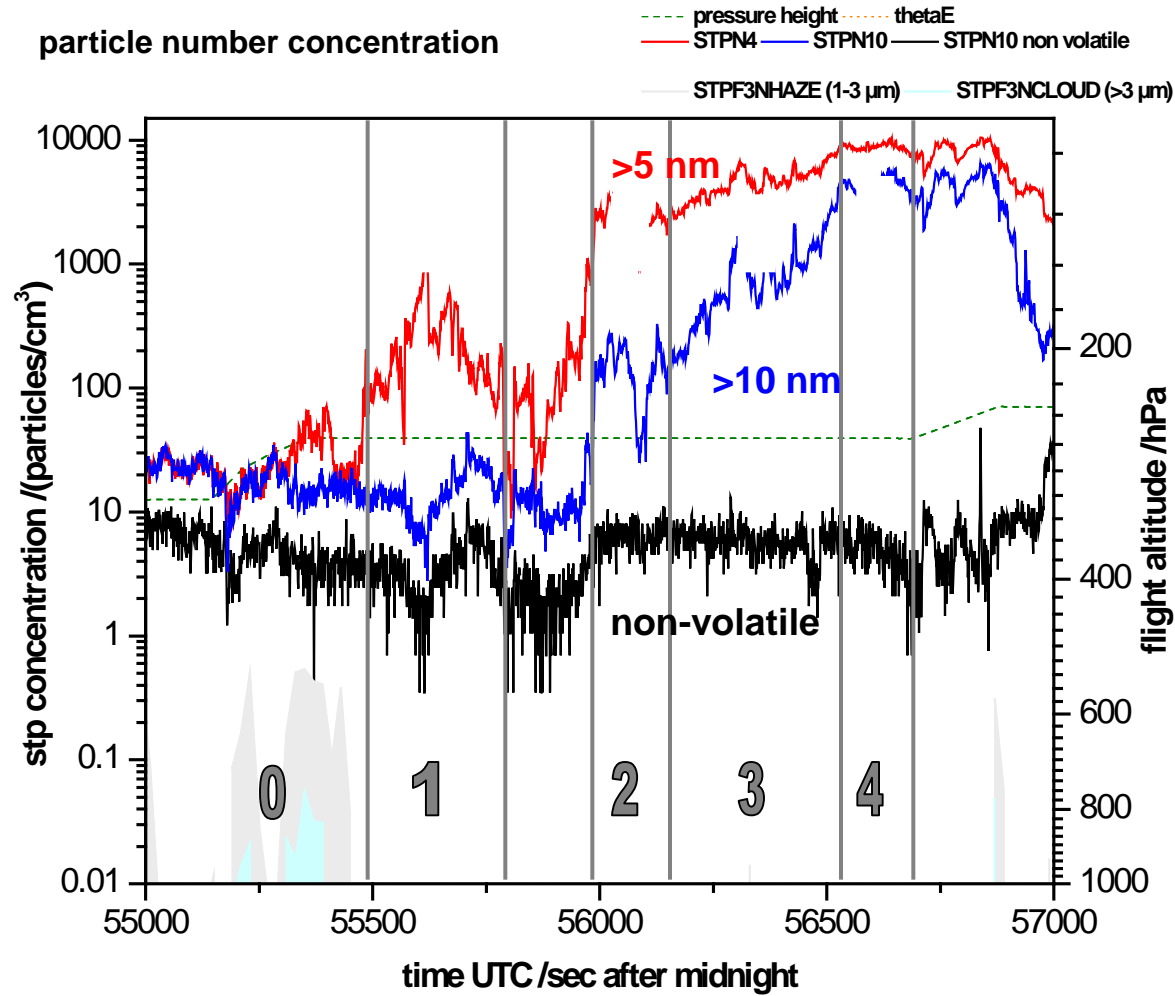
10:08 UTC - 11:15 UTC



# Partikel Anzahlkonzentration (Messflug 01.08.2006)



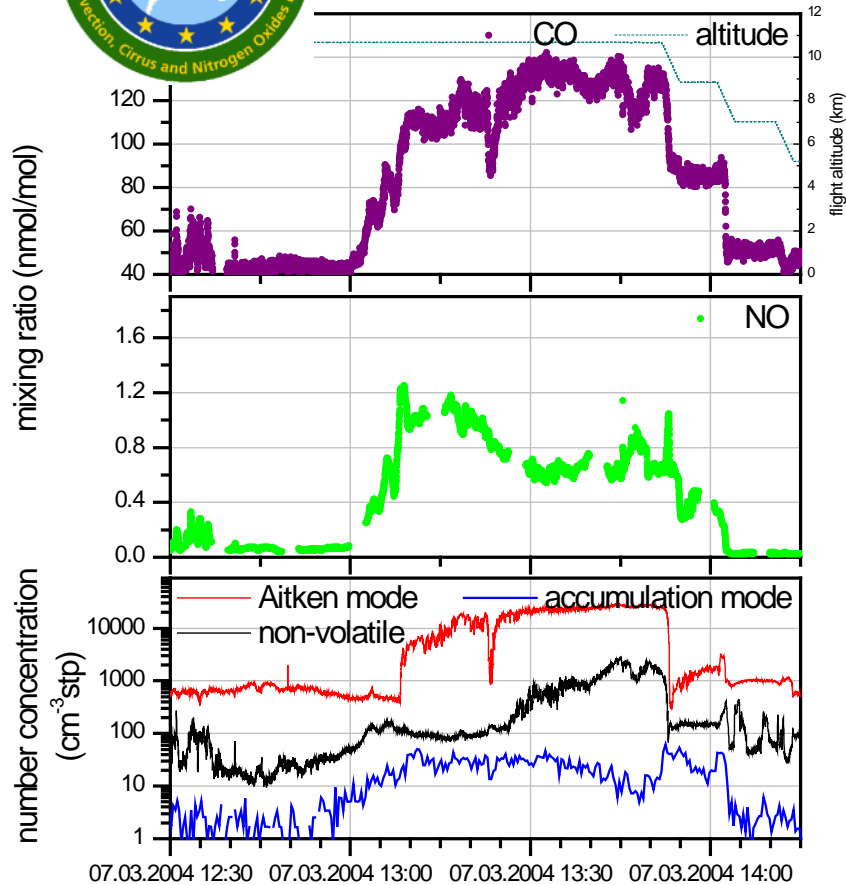
# Prozessierung von Partikeln im Gewitter „outflow“: Auswaschen – Partikelneubildung – Partikelwachstum



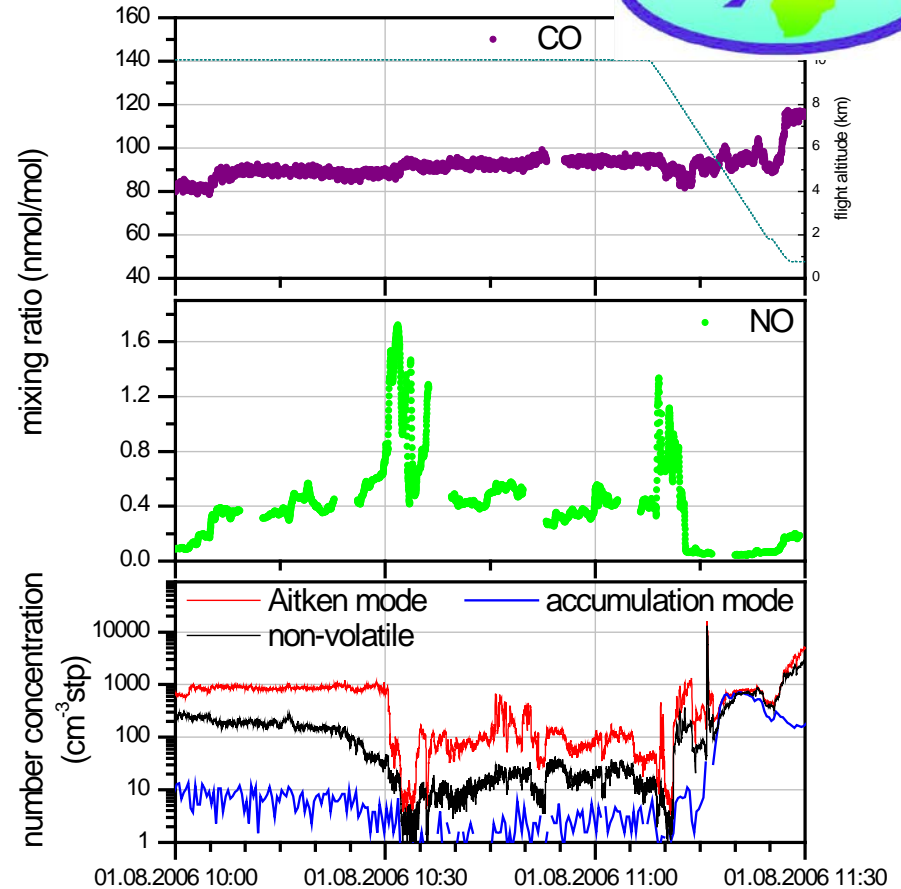
# Unterschiede in Aerosoleigenschaften im „outflow“ von großen Gewittersystemen (MCS)



MCS 7.03.2004

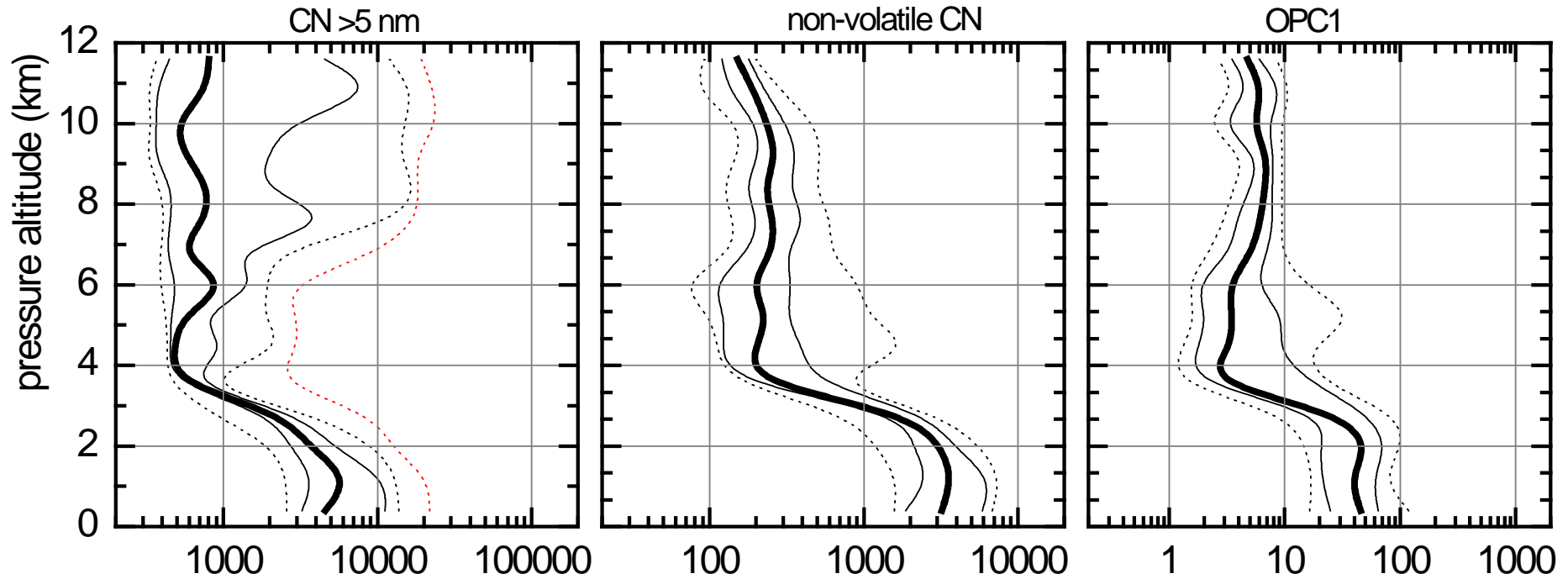


MCS 1.08.2007





# Vertikale Partikelverteilung bei DC3



# Eyjafjallajökull volcanic ash measurements by DLR Falcon

aerosol particle size distributions, particle samples, SO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, lidar, etc.

- 17 flights, 51 flight hours
- 35 plume encounters
- age estimates from 7 hours (May 2) to 5 days.

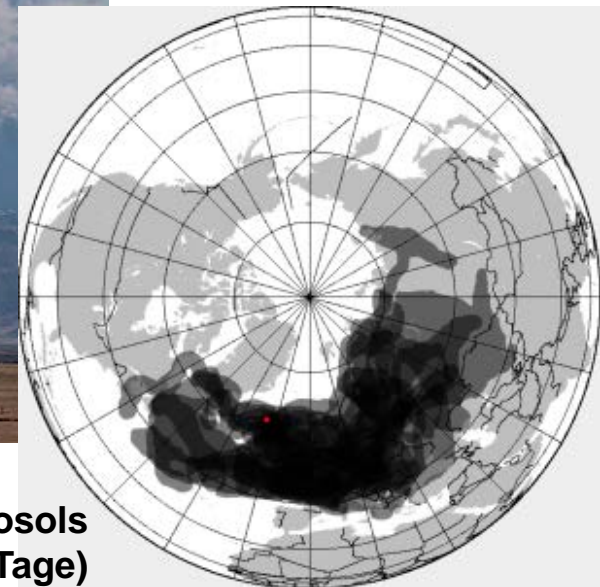




# Eyjafjallajökull .... ausgesprochen ['ɛɪja,fjatla.jœkytl]

## *Starker Ausbruch am Morgen des 14. April 2010*

- April 2009: Erste seismische Aktivitäten
- Februar – März 2010: hohe Anzahl von Erdbeben.
- 20. März 2010: Erste Eruption, 4 – 7 km hoch.
- 14. – 18. April: Aschewolken erreichen bis zu 8 km Höhe, Gletscherläufe, Flutwellen, Ascheschichten.
- 18. April – 1. Mai: Schwächere Eruptionen, 3 - 5 km.
- 6. – 21. Mai: neuer, stärkerer Ausbruch, bis 9 km Höhe.



[http://en.wikipedia.org/wiki/Air\\_travel\\_disruption\\_after\\_the\\_2010\\_Eyjafjallajökull\\_eruption](http://en.wikipedia.org/wiki/Air_travel_disruption_after_the_2010_Eyjafjallajökull_eruption)

**Verteilung des Vulkanaerosols  
(Composit der der ersten 10 Tage)**



# Gefährdung des Luftverkehrs

- 1) **Sandstrahleffekt:** Cockpit-Scheiben, Tragflächen-Aerodynamik, große Partikel nötig.
- 2) **Triebwerke**, dokumentiert in 300 bis 1000 km von der Quelle:
  - Silikat schmilzt bereits bei  $< 1000^{\circ}$  C,
  - Erosion an den Triebwerksschaufeln,
  - Verstopfen von Kühlluftbohrungen (Überhitzen)
  - Sauerstoffmangel (Flammabriss).
- 3) **Sensoren:** Höhen- und Geschwindigkeitsmesser können verstopfen.



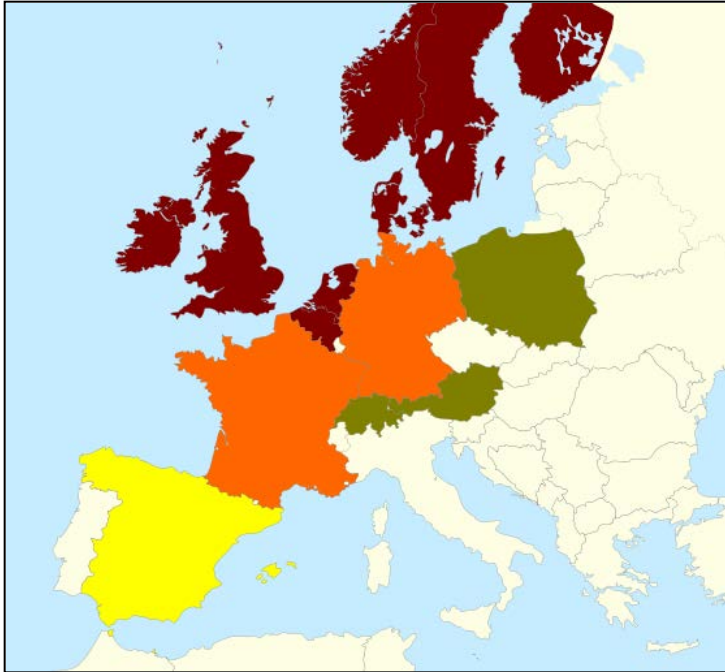
**Problem: tatsächliche Gefährdung abhängig von Aschekonzentration, Triebwerkstyp, Fluglage, ...!**

**April 2010: Keine Grenzwerte für sicheres Fliegen vorhanden!**



# Ausbruch des Eyjafjallajökull - Öffentliche

## Sperrung des Luftraumes



ab DO 15.4. **komplett geschlossen**

ab DO 15.4. **teilweise geschlossen**

ab FR 16.4. **teilweise oder komplett geschlossen**

am SA 17.4. **teilweise geschlossen**

(Wikimedia Commons)

- **Einschränkungen im persönlichen Leben**
- **Versorgungskrise, "Aschemonster"**
- **Maßnahmen willkürlich, Grundlage allein Modellrechnungen**



# Wo ist sie denn, die Aschewolke?



**19. April 2010, Oberpfaffenhofen**



# Wochenende 16. - 18. April 2010: Einbau der Instrumente





# 17. bis 19. April 2010: Der Druck wird immer größer...

VULKAN-ASCHE



## Ist das Flugverbot berechtigt oder ein Skandal?

SAMSTAG FIELEN IN EUROPA 17 000 FLÜGE AUS. AIRLINES KRITISIEREN, DASS DIE BEHÖRDEN DIE ASCHEKONZENTRATION IN DER LUFT GAR NICHT GEMESSEN HABEN

VON MICHAEL QUANDT

17.04.2010 - 22:13 UHR

17. April, 22:13 Uhr:

"Schließung des Luftraumes basiert nur auf Modellrechnungen."

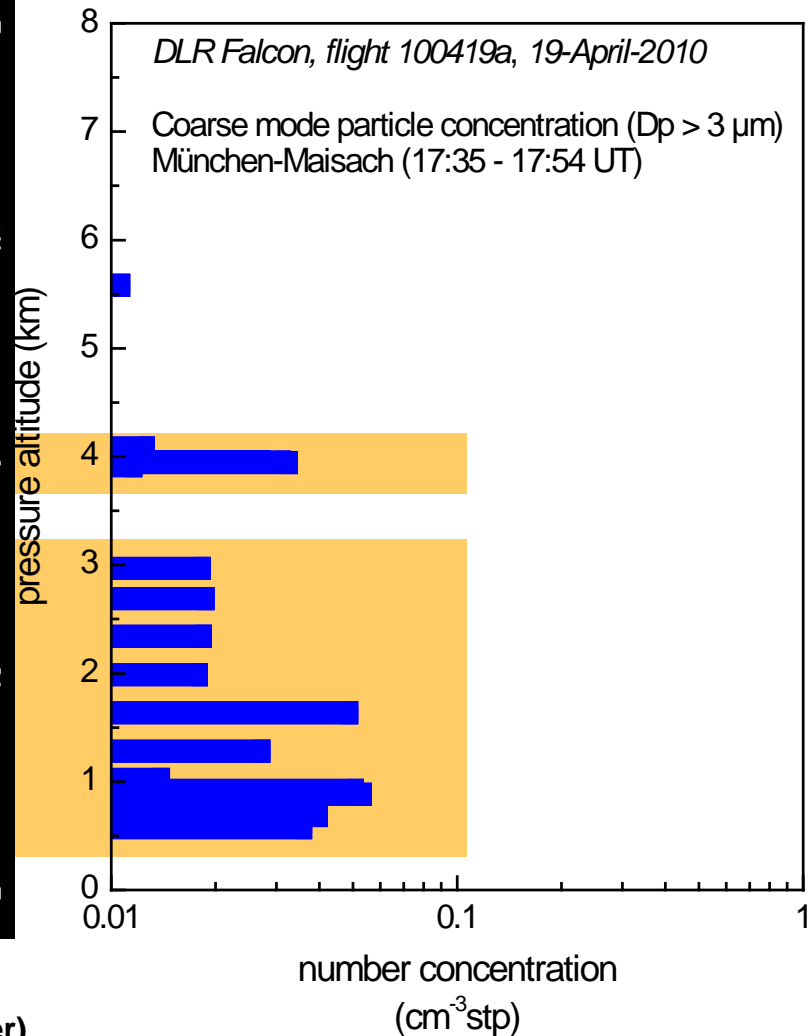
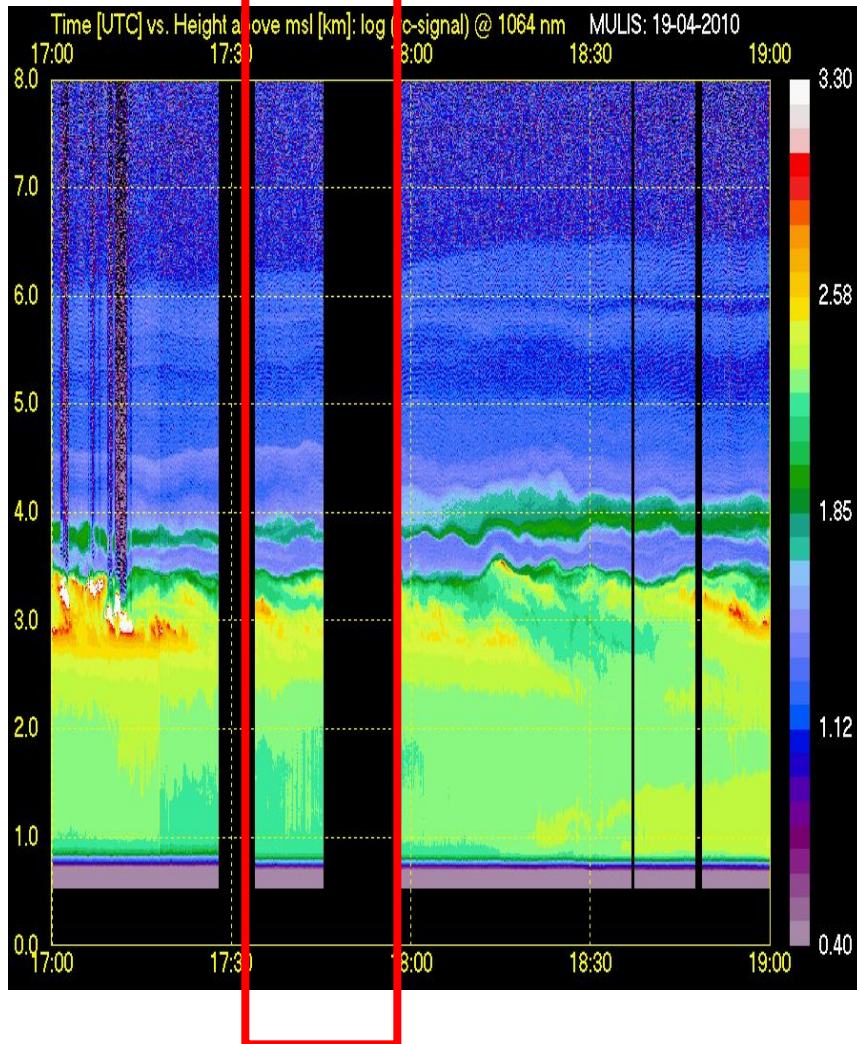
"Verkehrsminister Peter Ramsauer kündigte gestern an, am Montagabend ein Flugzeug mit Wissenschaftlern des Instituts für Atmosphärenphysik in Oberpfaffenhofen starten zu lassen."



19. April, Oberpfaffenhofen



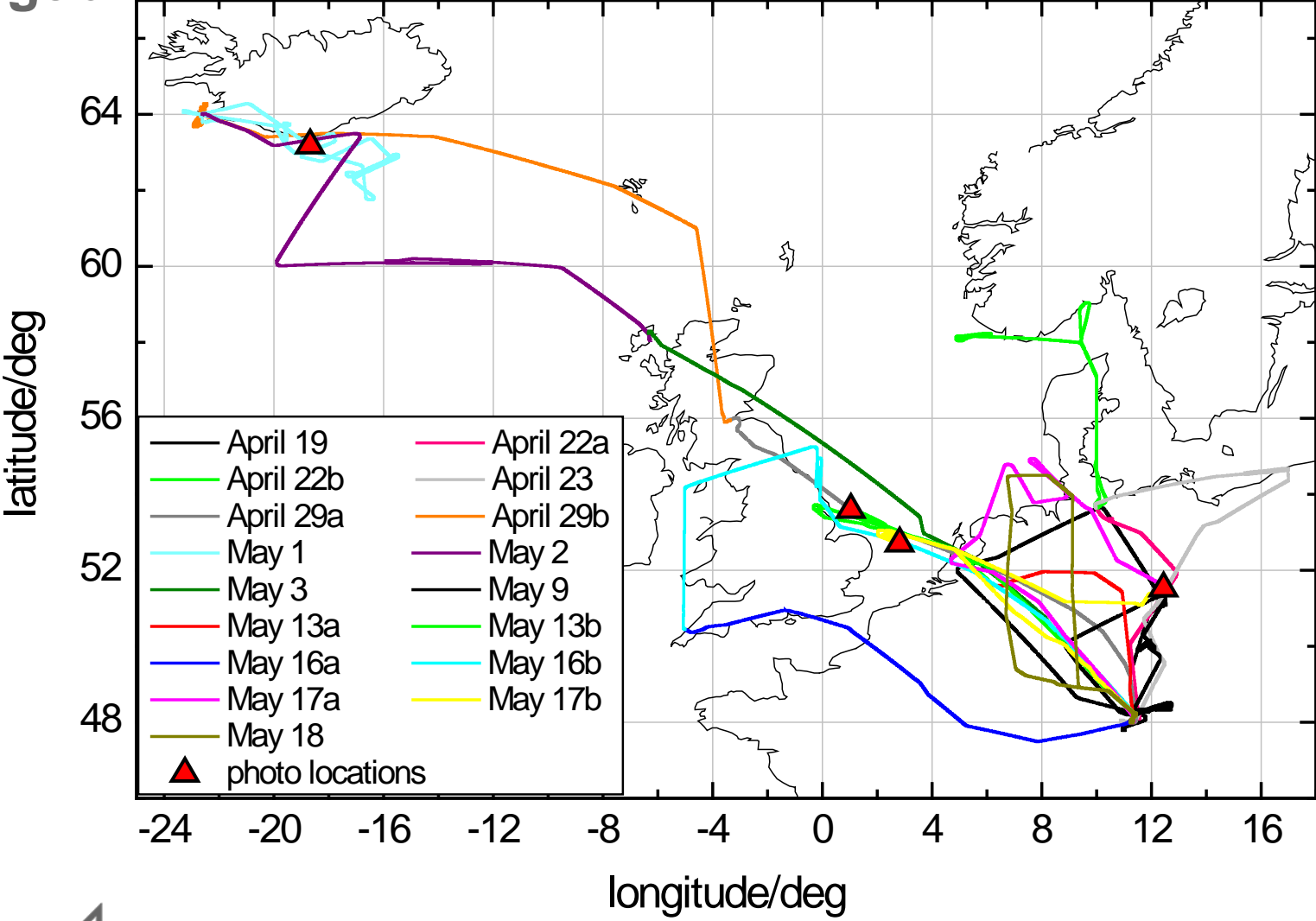
# Vulkanascheflug am 19. April 2011, 17:45 Uhr



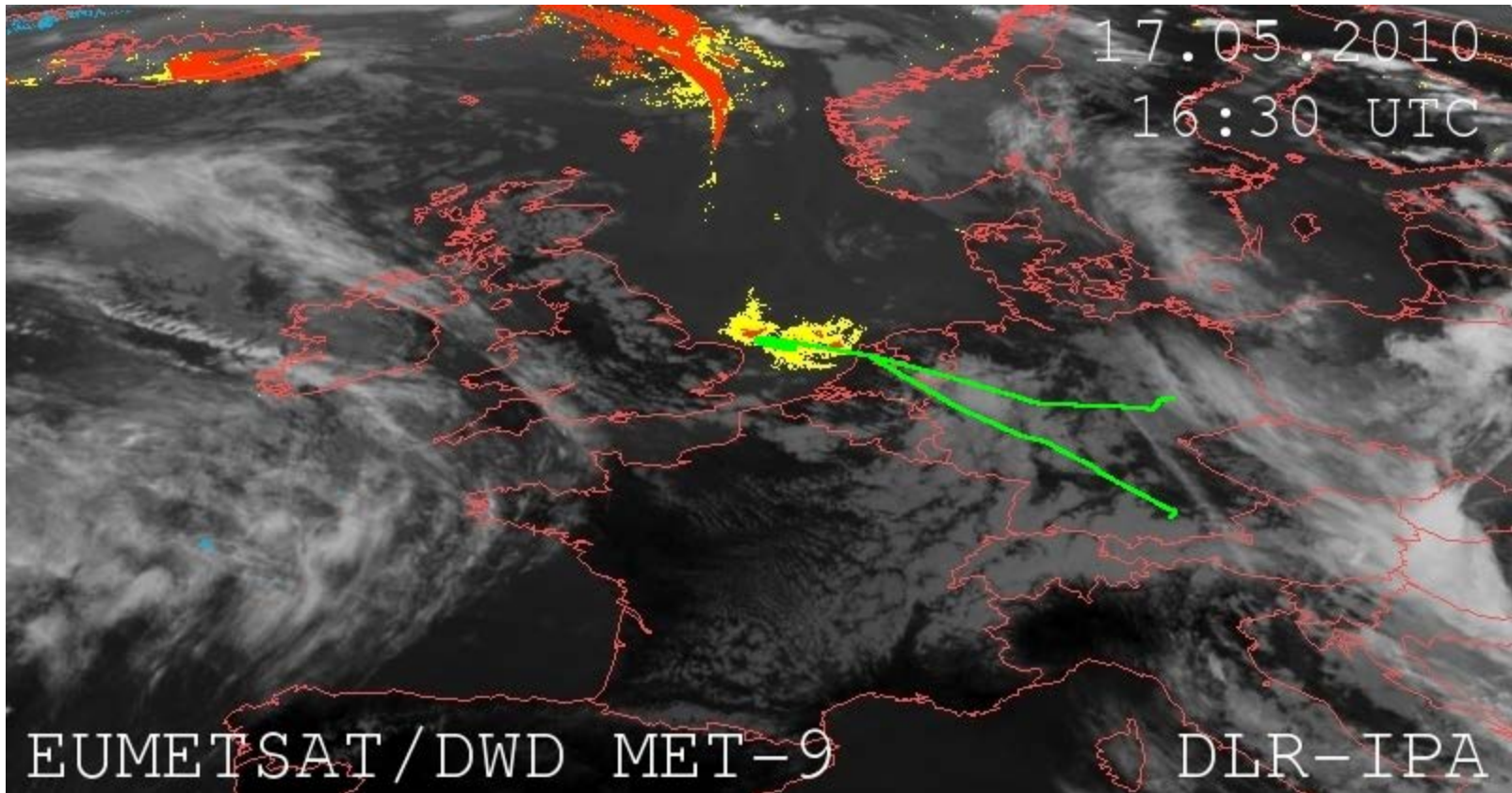
(LMU-MIM: V. Freudenthaler, S. Groß, M. Wiegner, B. Mayer)



# DLR-Vulkanaschemessungen: Wissenschaftl. Ergebnisse



May 17, 2010, case: Fairly dense plume over North Sea  
clearly seen in MSG ash retrievals, 60 min flight inside this plume



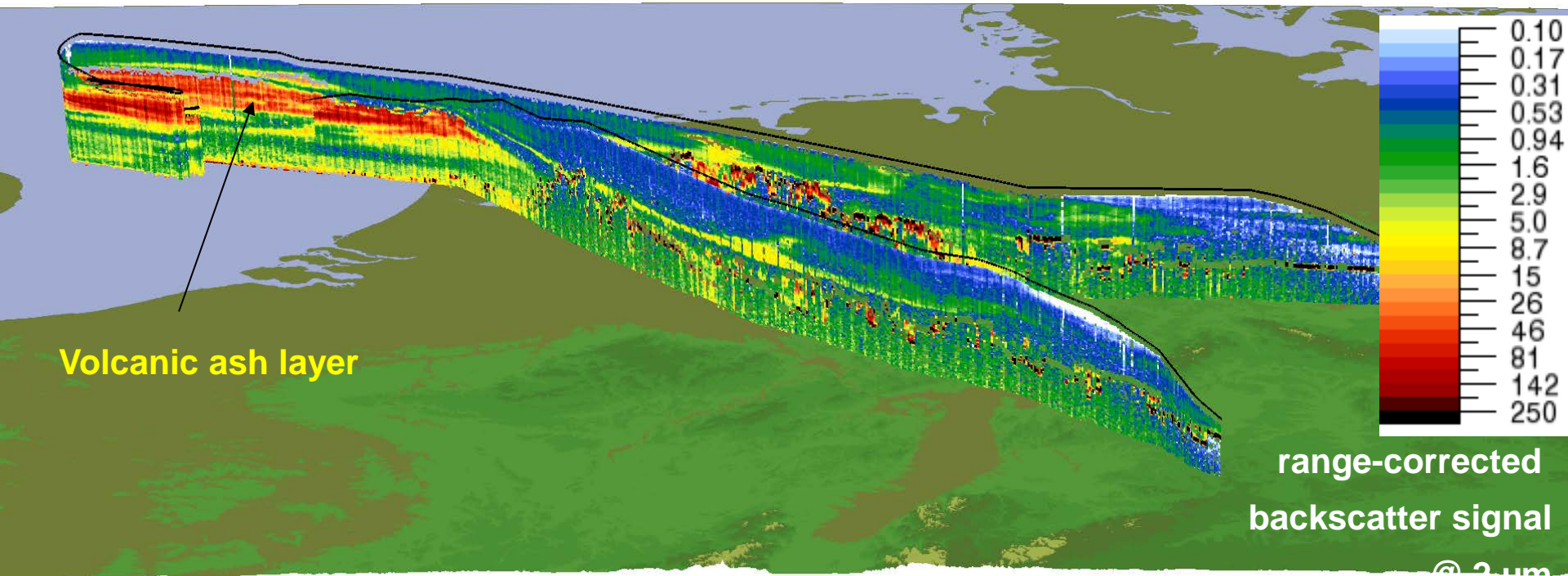
yellow = ash retrieval

green = Falcon flight track

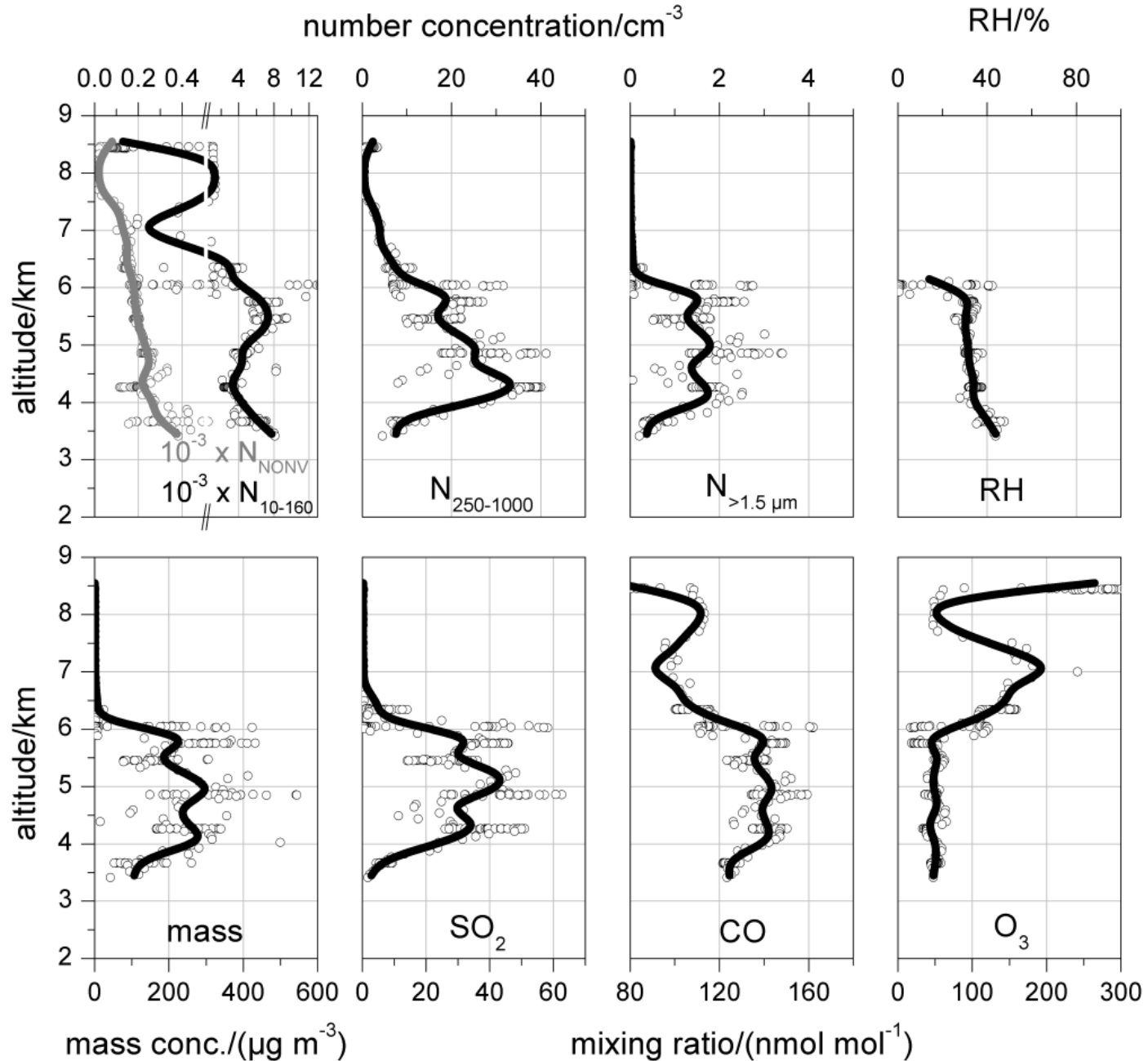
red = ash + SO2 retrieval



# May 17, 2010, case: Fairly dense plume over North Sea 60 min flight inside this plume

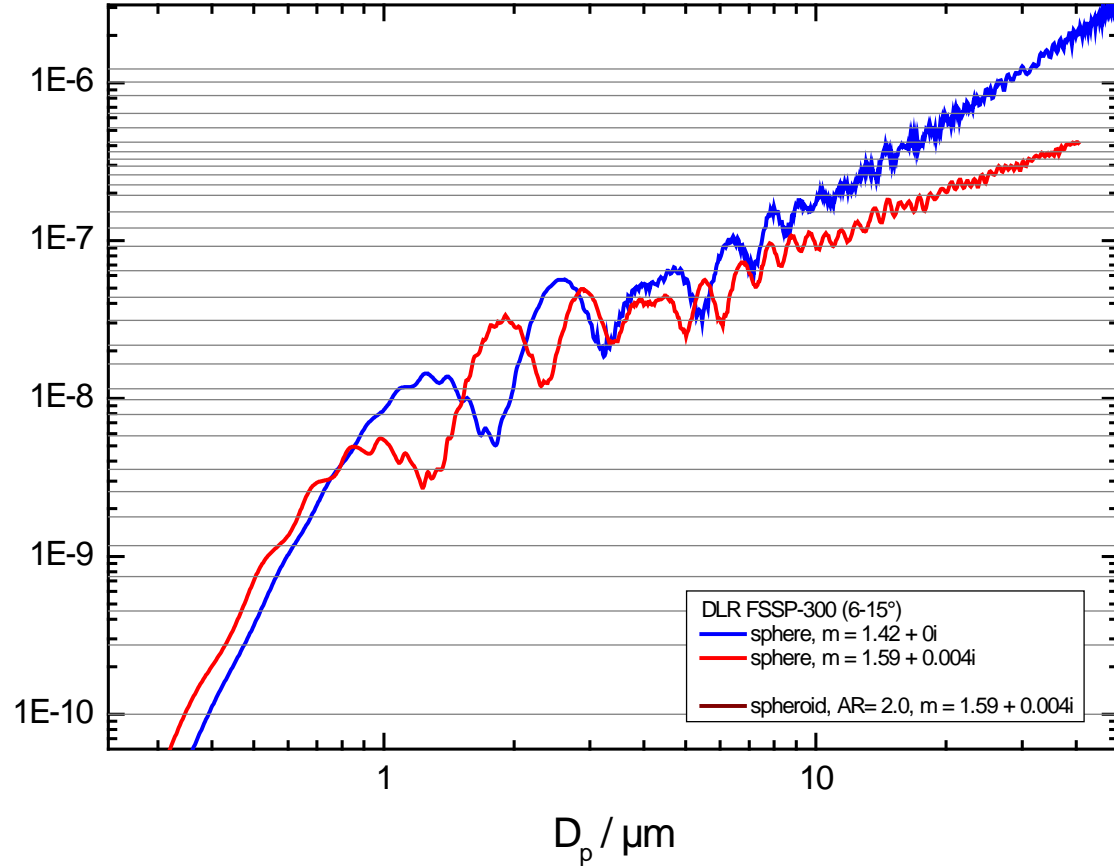
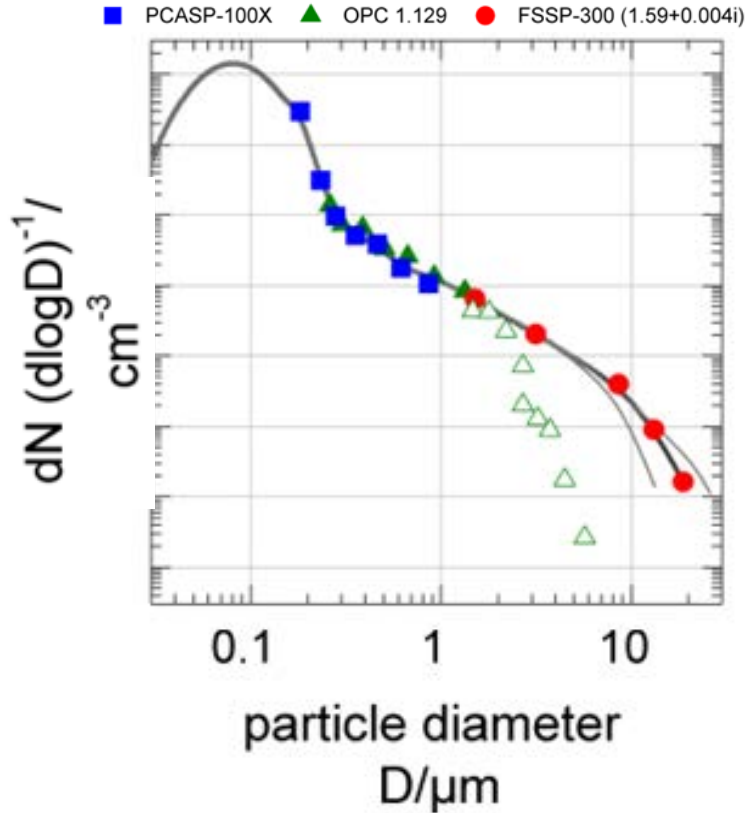


# Vulkanascheschicht am 17. Mai 2010, Schichtdicke 3 km



# Eine schwer messbare Größe: Asche-Massenkonzentration

## Zur Auswertung der FSSP-300



Anzahlgrößenverteilung  $\longrightarrow$  Volumengrößenverteilung (proportional  $D^3$ )  
 Volumengrößenverteilung + Annahme einer Partikeldichte  $\longrightarrow$  Masse



# Kann man "die Aschewolke" sehen?

**Eyjafjallajökull Aschewolke am 1. Mai, mittags**





# Ist die Asche auch in größerer Entfernung v. Vulkan sichtbar?

1. Mai 2010

13. Mai 2010

Mittelwert: 12 [11-20]  $\mu\text{g m}^{-3}$

Maximum (10s Mittel): 32 [13-56]  $\mu\text{g m}^{-3}$

19. April 2010

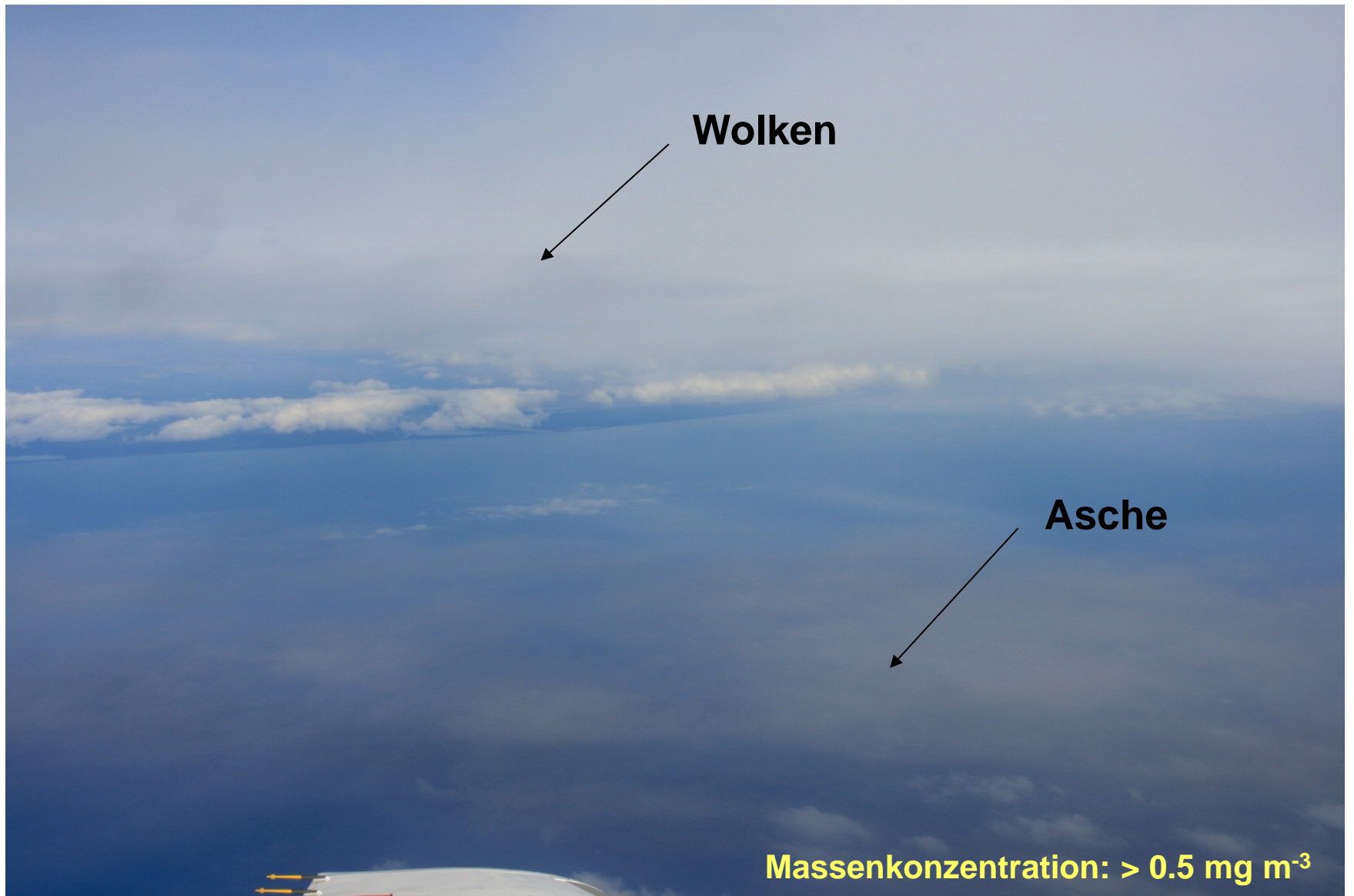
17. Mai 2010

Mittelwert: 25 [17-42]  $\mu\text{g m}^{-3}$

Maximum: 48 [31-107]  $\mu\text{g m}^{-3}$

Mittelwert: 186 [105-283]  $\mu\text{g m}^{-3}$

Maximum: 544 [282-830]  $\mu\text{g m}^{-3}$

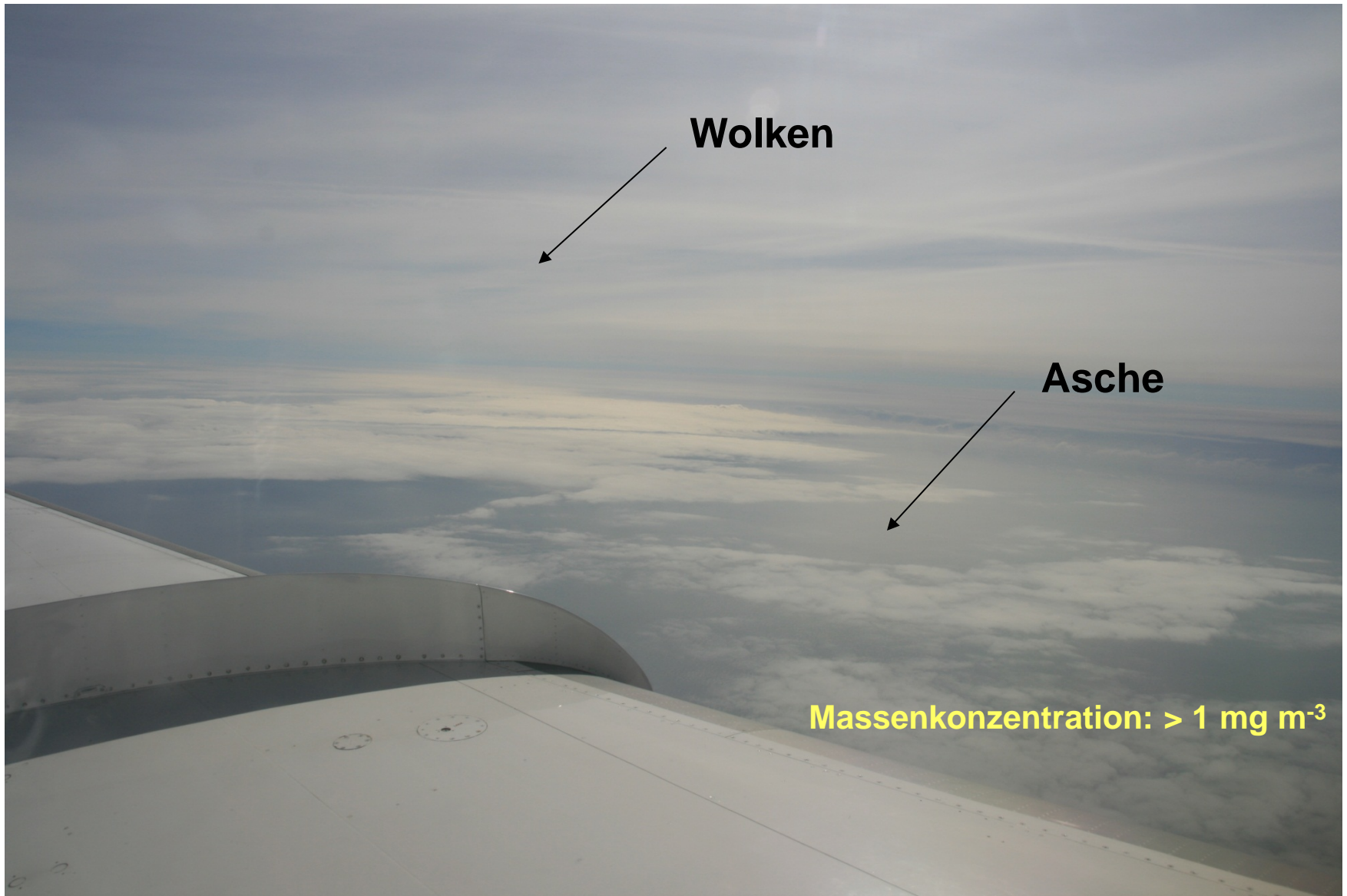


**Wolken**

**Asche**

**Massenkonzentration: > 0.5 mg m<sup>-3</sup>**





**Wolken**



**Asche**



**Massenkonzentration: > 1 mg m<sup>-3</sup>**



# Welche Aerosole sieht man hier?



**Verbrennungsaerosol**

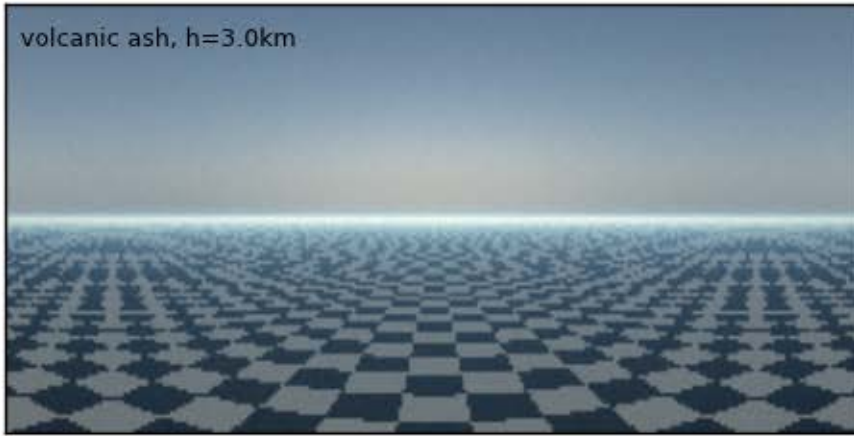
**Wüstenstaub**

**19. Januar 2008, Kapverden**

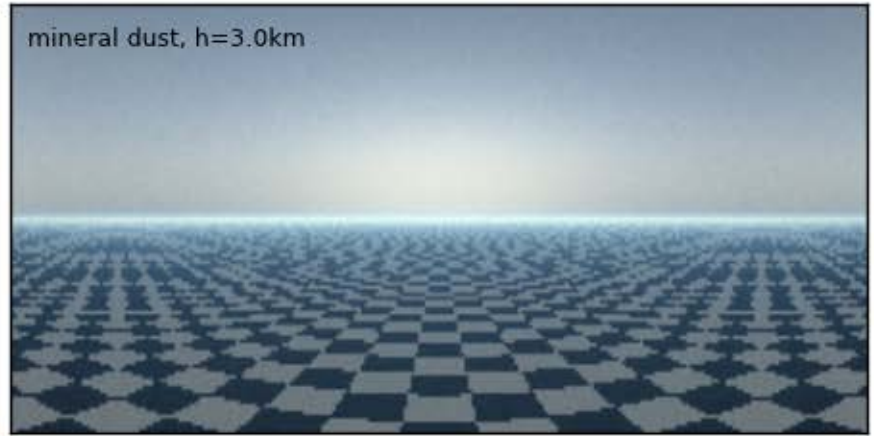


# Kann ein Pilot Vulkanasche von Saharastaub unterscheiden?

## Vulkanasche



## Saharastaub



Sonne im Rücken:

- Asche ist sichtbar (unter best. Umständen)
- Eine "graue" Schicht kein eindeutiges Indiz, dass es sich um Vulkanasche handelt.



# Lehren aus den Eyjafjallajökull-Messflügen

- Flugverkehr offensichtlich unvorbereitet (Messnetz, Grenzwerte)
- Grenzwert für "sicheres Fliegen" inzwischen definiert
- Verantwortung an Airlines übertragen
- Vorhersagen sind in Zukunft viel schwieriger, da die Modelle nicht nur die Lage der Ascheschicht, sondern auch die Aschekonzentration (Grenzwert!) vorhersagen müssen.
- Wissenschaftliche Flugzeugmessungen sind geeignet, Vulkanstaub zu detektieren und liefern wichtige Daten zur Charakterisierung der Situation, sowie zur Modellüberprüfung. Man muss jedoch eine geeignete Instrumentierung zur Messung der großen Aschepartikel verfügbar haben.
- Forschungsanstrengungen nötig in Bezug auf Massekonzentrationen und einfacher Routine-Sensoren





Danke!



Mit Dank auch an meine Kollegen:

B. Weinzierl, H. Huntrieser, A. Petzold, H. Schlager, A. Ibrahim, ...



