

Kondensstreifen und deren Vermeidung

Klaus Gierens

Institut für Physik der Atmosphäre, DLR Oberpfaffenhofen



Wissen für Morgen



Was sind Kondensstreifen und wie entstehen sie?



Foto: D. Klatt, Oldenburg



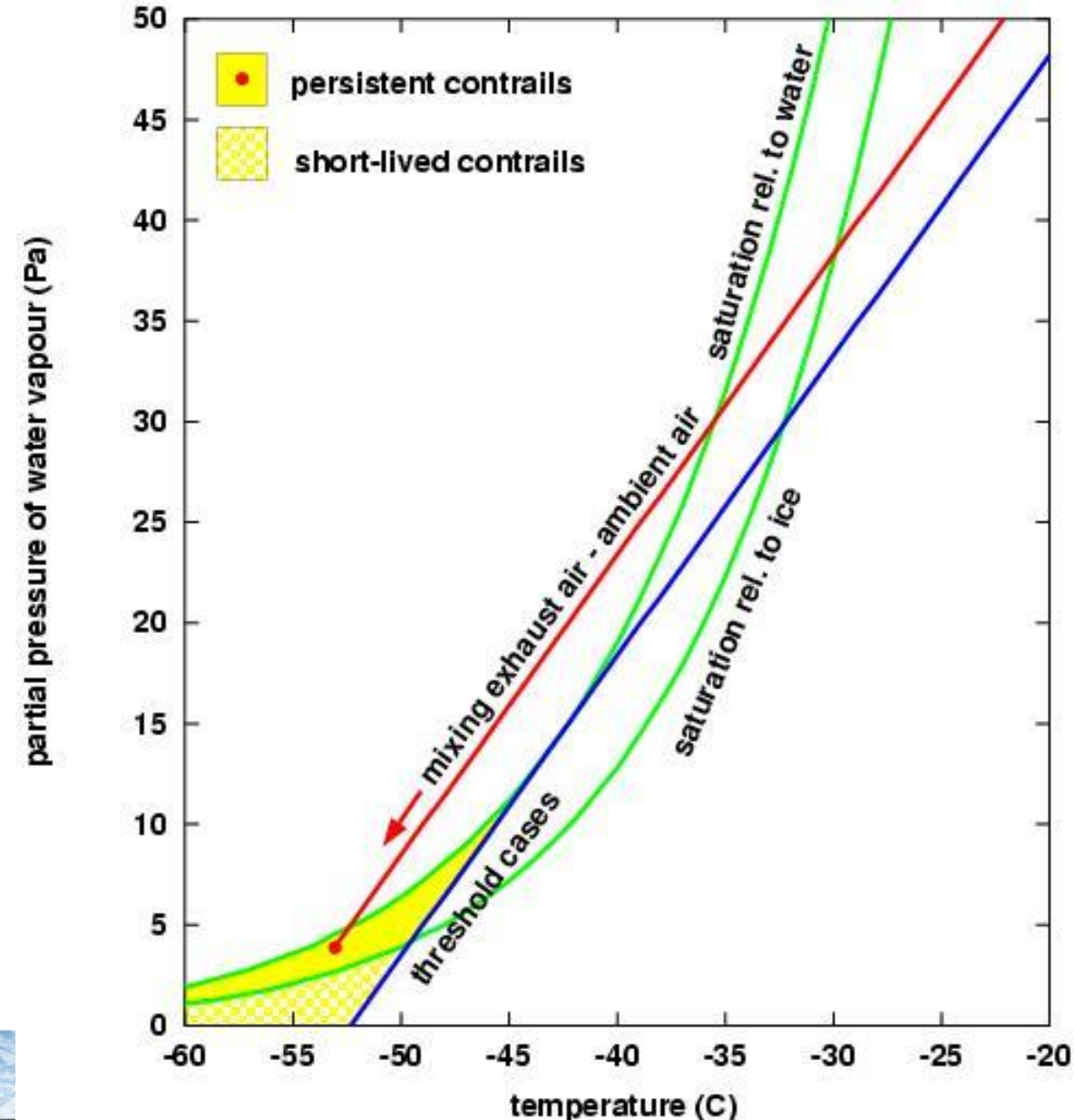
Was sind Kondensstreifen und wie entstehen sie?



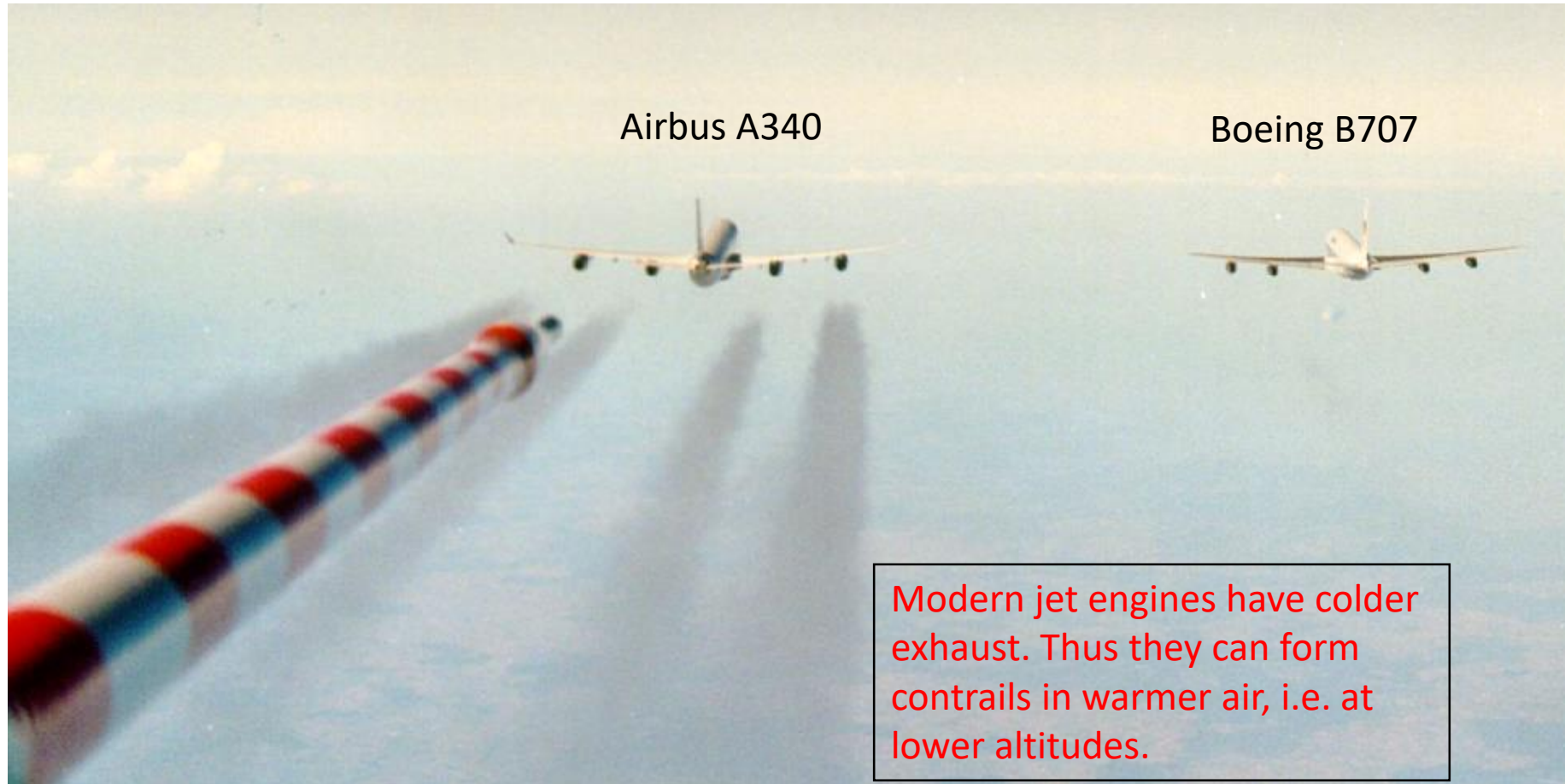
Was sind Kondensstreifen und wie entstehen sie?

- Verbrennen von Kerosin setzt CO₂ und Wasserdampf frei
- Der heiße Abgasstrahl expandiert und mischt sich isobar mit der kalten Aussenluft
- Wenn bei dieser Vermischung Übersättigung relativ zu flüssigem Wasser erreicht wird, entsteht ein KS.

$$G = \frac{c_p p}{\varepsilon} \frac{EI_{H_2O}}{(1-\eta)Q}$$



Eine kontraintuitive Konsequenz: moderne Flugzeuge machen mehr KS als alte!



Schumann et al., 2000

Kondensstreifen nur in großer Höhe?

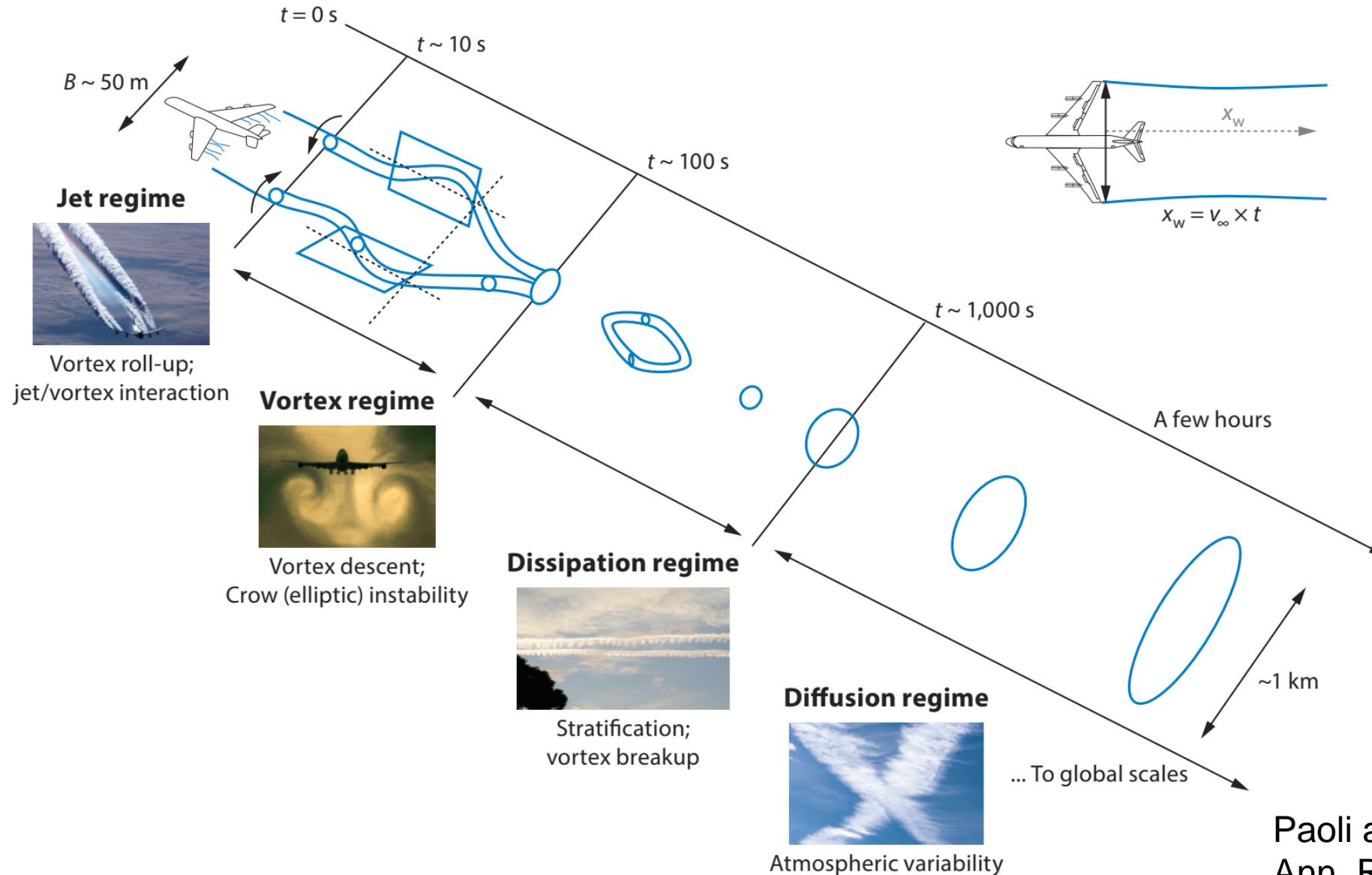


Bildung eines Kondensstreifens beim Start in sehr kalter Luft: $T = -45^{\circ}\text{C}$

https://www.reddit.com/r/aviation/comments/ugtymq/when_you_hit_the_chemtrail_switch_too_early_by/



Wie entwickeln sich Kondensstreifen?

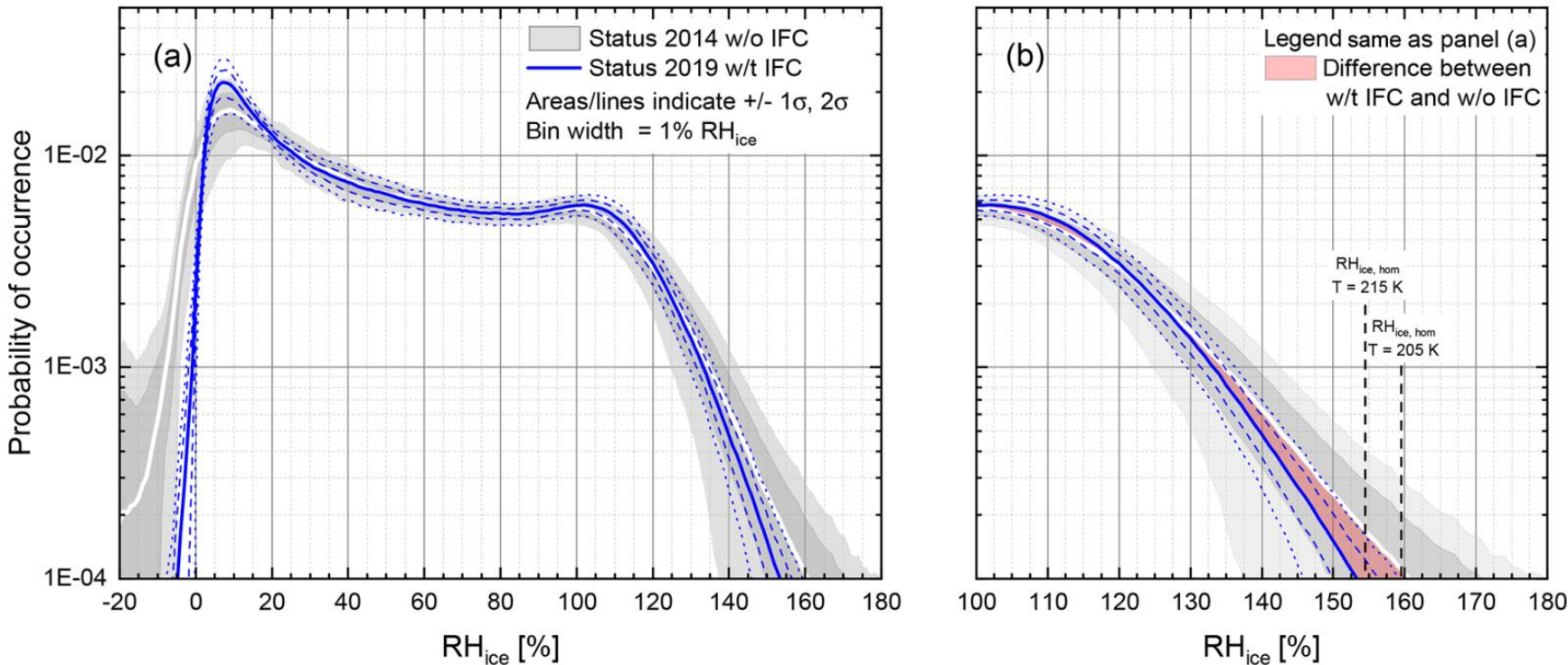


persistente (d.h. langlebige) Kondensstreifen: Eisübersättigte Regionen (ISSR)

- klimawirksam sind nur persistente Kondensstreifen
- Persistenz benötigt Eisübersättigung ($RH_i \geq 100\%$)
- Eisübersättigung am häufigsten 0-200 hPa unterhalb der TP
- Tritt auf 10-15% der gesamten Flugstrecken auf



Foto: N. Dotzek



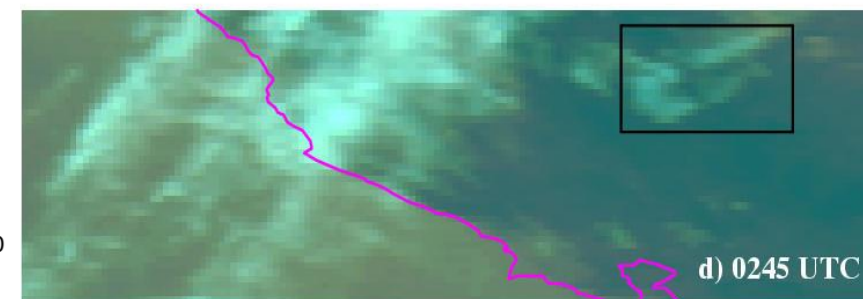
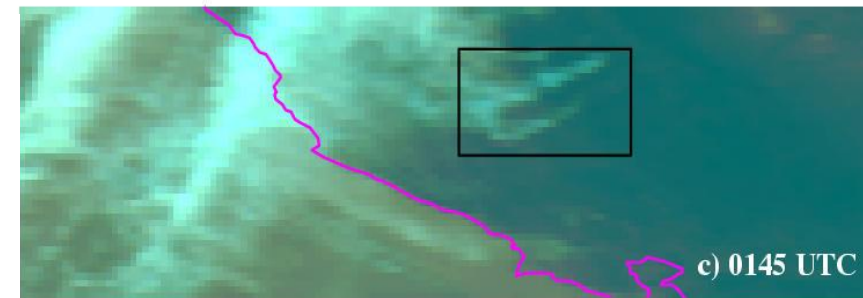
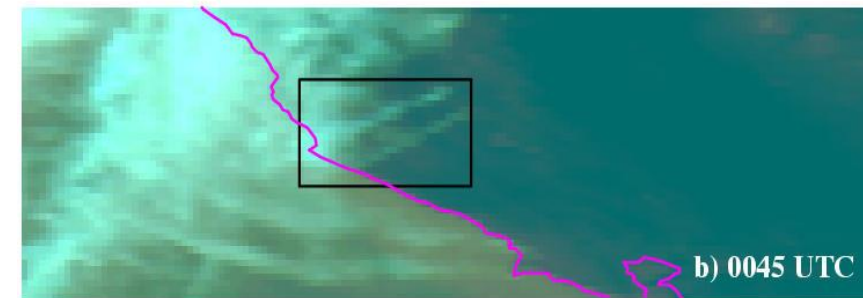
MOZAIC Daten 1995-2010
 Petzold et al. 2021



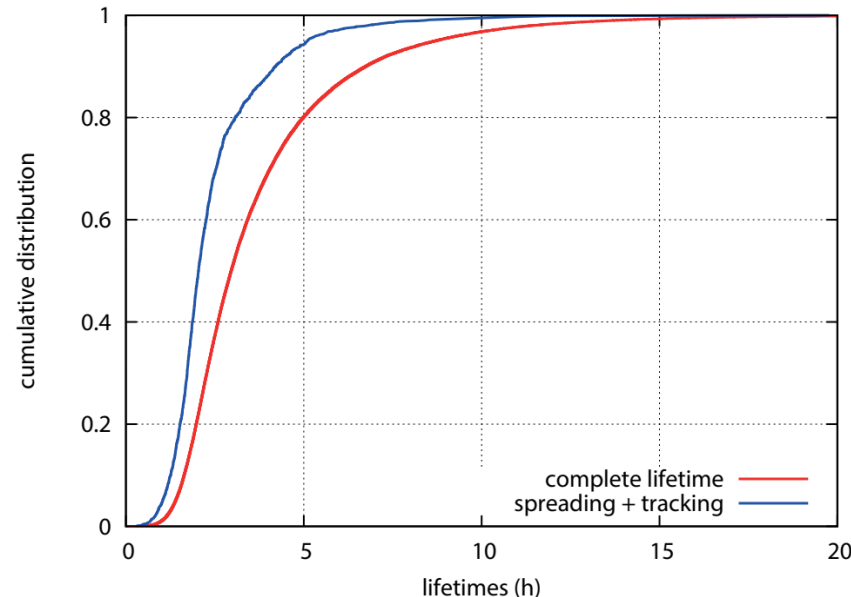
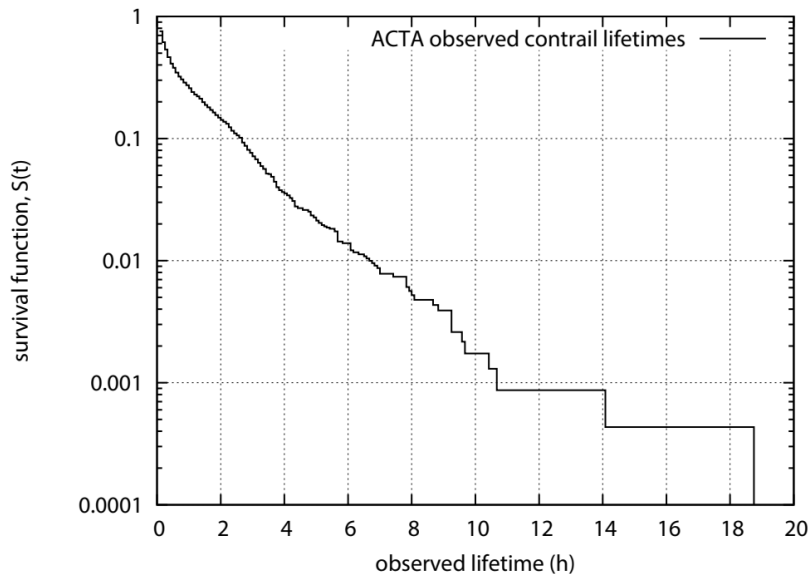
„Lebens“dauer von Kondensstreifen

- die meisten Kondensstreifen sind kurzlebig ($RHi < 100\%$)
- 10-15% der KS sind persistent
- typische Lebenszeit 2-3h, aber es sind auch >17 h beobachtet worden
- KS enden durch Subsidenz oder Ausfallen der gewachsenen Eiskristalle

Minnis et al. 1999



Gierens & Vazquez-Navarro, 2018



Strahlungswirkung von Kondensstreifen: Langwellige und kurzwellige Kontraste

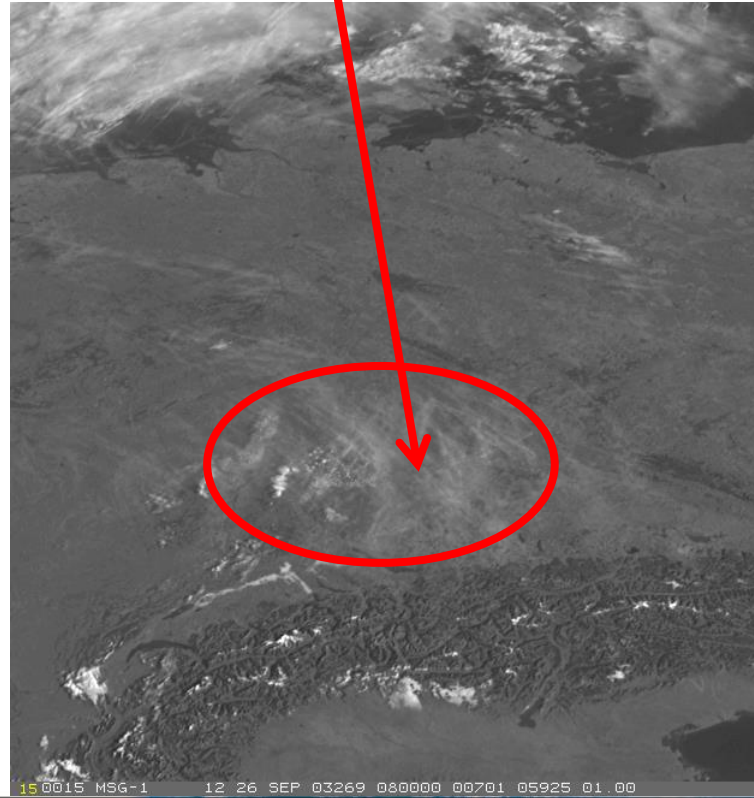
Einflüsse von:
Temperatur des KS
Bodentemperatur
Sonnenstand
Albedo des Hintergrunds
Kristallformen und -größe

Starke Erwärmung bei kalten
KS über warmem Untergrund

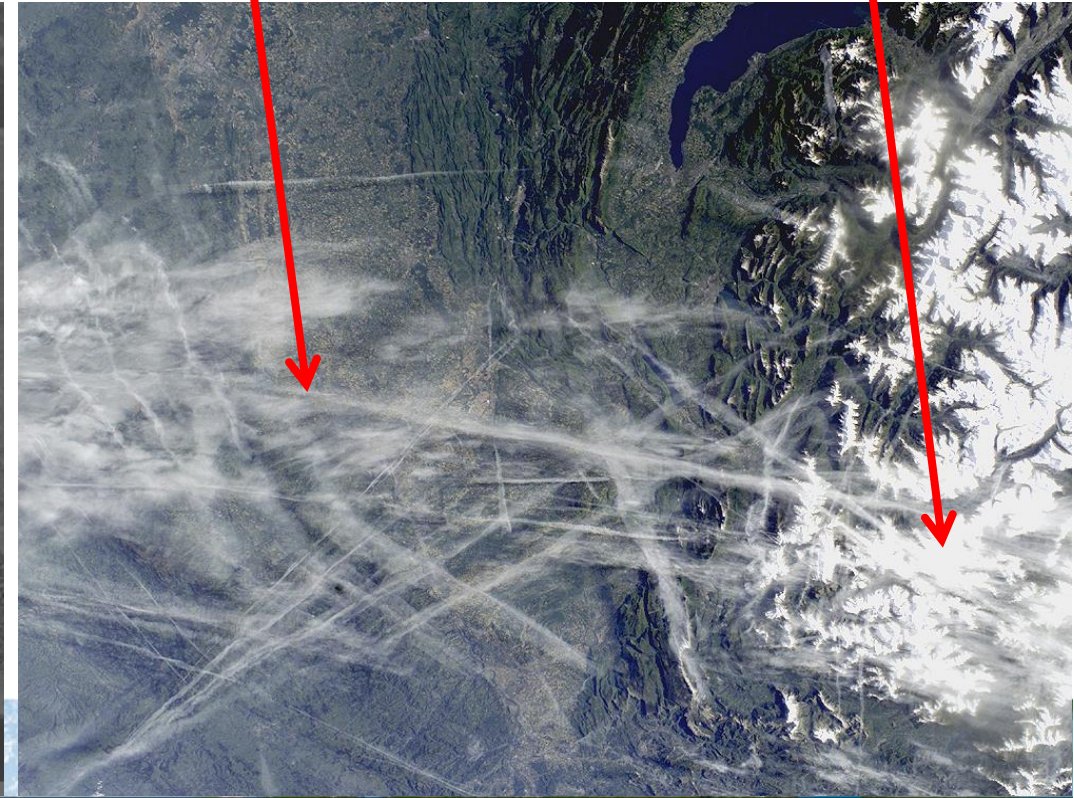
Starke Kühlung bei dicken KS
über dunklem Untergrund



LW Kontrast: Erwärmung



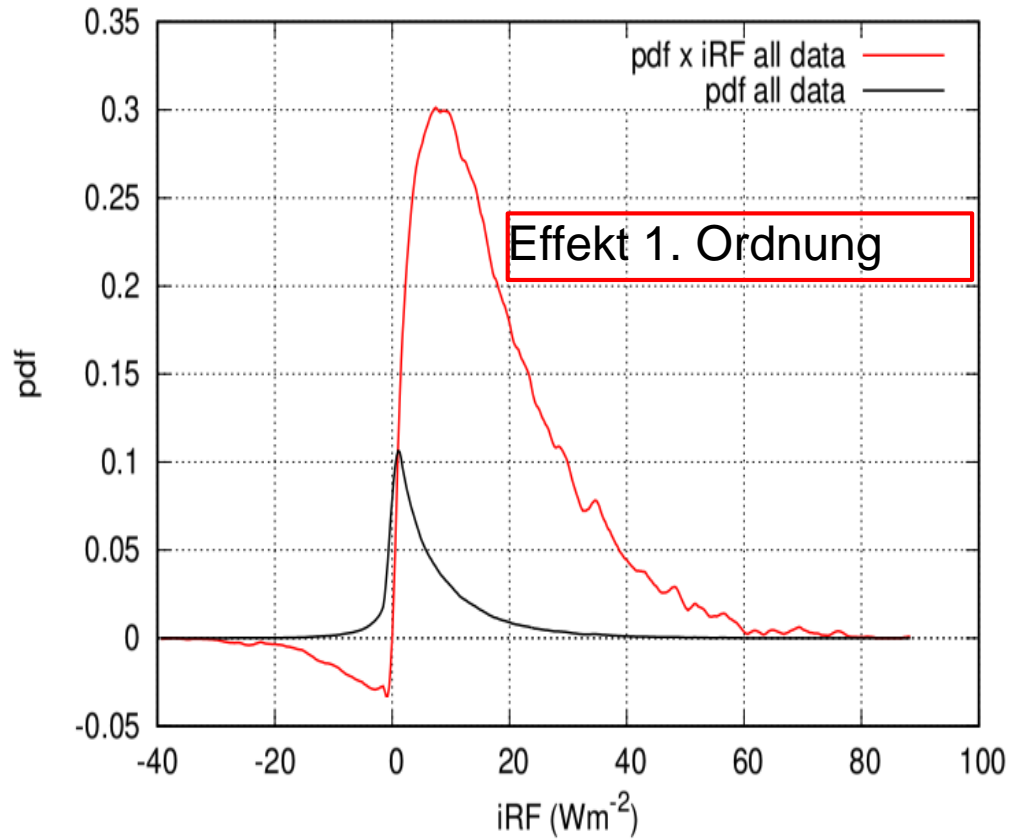
SW Kontrast: Kühlung



kein SW Kontrast



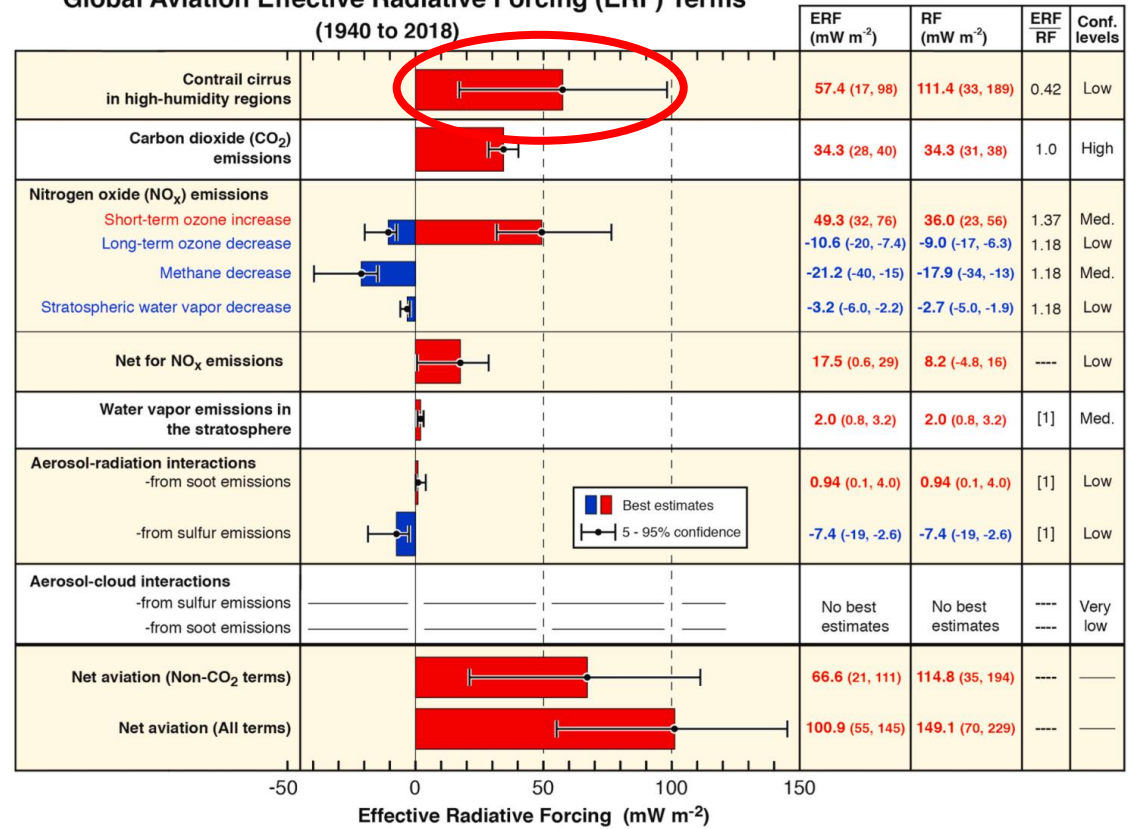
Einzelwirkung vs. Gesamtwirkung



Wilhelm et al., 2021



Global Aviation Effective Radiative Forcing (ERF) Terms
(1940 to 2018)



Lee et al. 2021

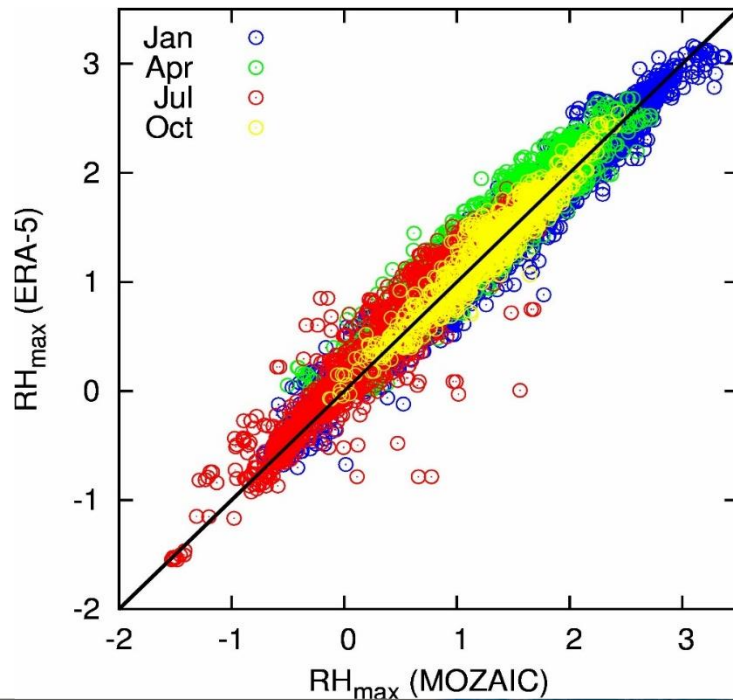


Vermeidung persistenter Kondensstreifen \Leftrightarrow Meiden von ISSR

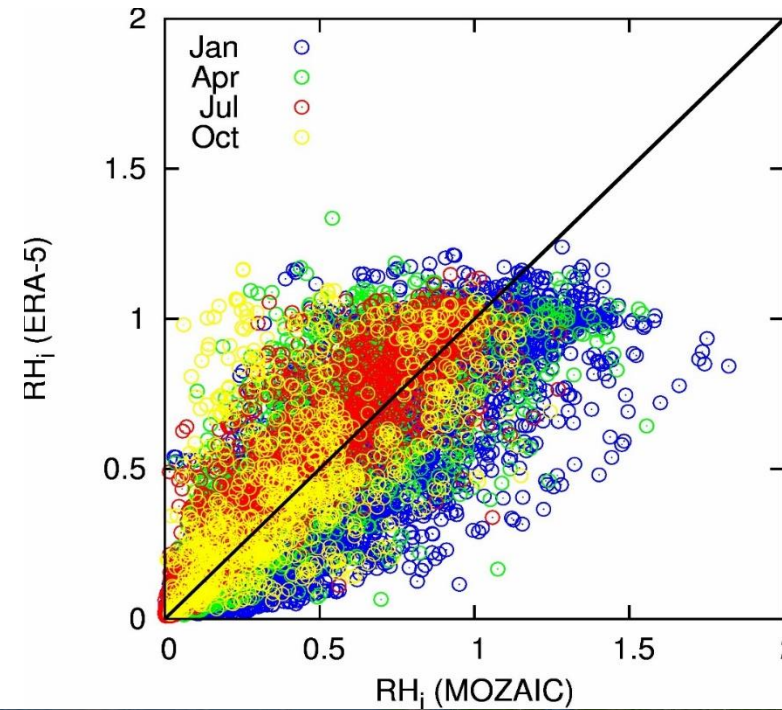
• Drei Schritte mit wachsendem Schwierigkeitsgrad:

1. Vorhersage der **Bildung** von Kondensstreifen \Rightarrow Schmidt-Appleman Kriterium
2. Vorhersage der **Persistenz** von Kondensstreifen \Rightarrow Vorhersage von Einsübersättigung (ISSR)
3. Vorhersage der individuellen **Strahlungswirkung** eines Kondensstreifens in einer geeigneten Metrik (RF, ERF, ATR, ...)

Schmidt-Appleman criterion ($RH_{max} > 1$)



Contrail persistence criterion ($RH_i > 1$)

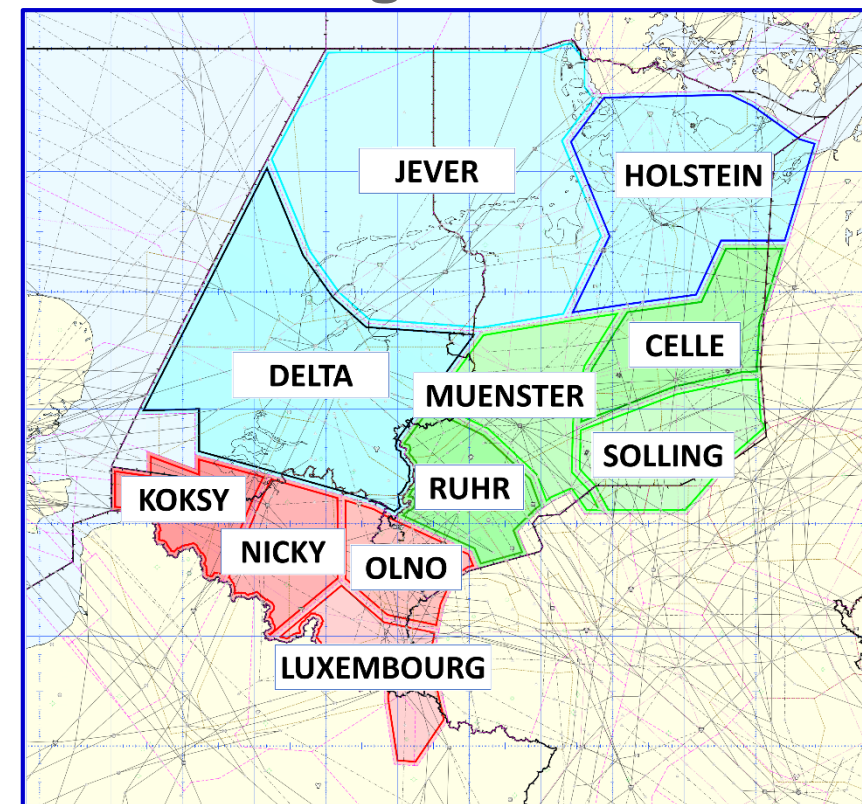


Gierens et al. 2020

Das DLR-MUAC Experiment zur Kondensstreifenvermeidung

- 1. Februar – 22. Oktober 2021, jeweils 1600-2200 UTC
- Fluglevels 240 – 400 (hft)
- ICON-EU Vorhersagen zu Temperatur und relative Feuchte
- Vermeidung (taktische Maßnahmen) jeden geraden Tag, wenn und wo möglich
- Validierung mit Hilfe von MSG Satellitendaten

cases		985	23
persistent contrails observed	yes	44.9 a	21.7 a'
	no	55.1 c	78.3 c'



- Es konnte statistisch belegt werden, dass $a/c > a'/c'$ ist, und zwar nicht nur aufgrund zufälliger Fluktuationen.
- **Persistente Kondensstreifen können also im Flugbetrieb mit taktischen Maßnahmen vermieden werden.**
- Allerdings, wie $a/c = 44.9/55.1$ zeigt, ist die Vorhersage noch stark verbesserungswürdig.



Weitere Schritte

- Verbesserung der Vorhersage von RH und ISSR in der oberen Troposphäre:
 - Reguläre Feuchte-Messungen in Reiseflughöhen mit Instrumenten an Bord von Verkehrsflugzeugen (e.g. AMDAR, aber stark ausgebaut!)
 - Assimilationen von Feuchtedaten der oberen Troposphäre in Wettermodelle
 - Verbesserte Darstellung der Wechselwirkung von Zirren mit dem umgebenden Feuchtefeld in Wettermodellen
- Verbesserte Methoden zur Identifikation von Kondensstreifen in Satellitenbildern zur Validierung
- Verbesserung der operationellen Maßnahmen
 - Herstellung des Verständnisses für die Maßnahmen bei Piloten und Kontrolleuren
 - Automatisierung der Abläufe in den Flug-Kontrollzentren
- Berücksichtigung aller CO₂ und nicht-CO₂ Effekte in zukünftigen Maßnahmenpaketen zur Reduzierung der Klimaeffekte des Luftverkehrs ⇒ ökoeffiziente Flugroutenplanung



Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit



Foto: Ron Smith, Henstridge in Somerset UK