

# Mitteilung

## Von:

Prof. Dr. Dieter Scholz, MSME  
Aircraft Design and Systems Group (AERO)

AERO\_M\_Kondensstreifen\_23-10-20.pdf  
<https://purl.org/aero/M2023-10-20>

Department F&F, HAW Hamburg  
Berliner Tor 9, 20099 Hamburg

**Datum:** 2023-10-20

Tel.: 040 - 18 11 98 81  
E-Mail: [info@ProfScholz.de](mailto:info@ProfScholz.de)

---

## Kondensstreifen

### Inhaltsverzeichnis

- Einleitung
- Schmidt-Appleman-Diagramm und Kriterium
  - Einleitung
  - Das Schmidt-Appleman-Kriterium
  - Constructing the SAD
  - Constructing a SAD with Iso-Lines of Relative Humidity
  - Intersections of the Temperature Curves with the Saturation Lines
- Flight Planning
- The Rich-Quench-Lean (RQL) Combustor – Causing More Contrails than Average

### Einleitung

*Die Auswirkungen des Flugverkehrs auf das Klima beschränken sich nicht nur auf die Emission von Verbrennungsprodukten wie Ruß, H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub> und NO<sub>x</sub>. Durch die Triebwerke wird in entsprechend kalten und feuchten Regionen der Atmosphäre Wolkenbildung eingeleitet.*

*Kondensstreifen sind linienförmige, von Flugzeugen verursachte Zirruswolken. Der Energiehaushalt der Erdatmosphäre wird stark von Wolken beeinflusst. Wolken reflektieren einerseits einen Teil der einfallenden Sonnenstrahlung, sodass sie auf die Erdoberfläche kühlend wirken. Andererseits vermindern Wolken die Abstrahlung von Wärme vom Erdboden in den Weltraum; dadurch wirken sie erwärmend.*

*Nur unter bestimmten atmosphärischen Voraussetzungen werden die Wasserdampfemissionen eines Flugtriebwerkes als Kondensstreifen sichtbar. Kondensstreifen bilden sich, wenn die Atmosphäre genügend kalt ist. Die genaue Grenztemperatur, unterhalb der sich Kondensstreifen bilden, hängt von der Flughöhe, der Umgebungsfuchte, dem Treibstoff und dem Wirkungsgrad des Flugzeugs ab. Sie liegt zwischen -35 und -55°C. In trockener*

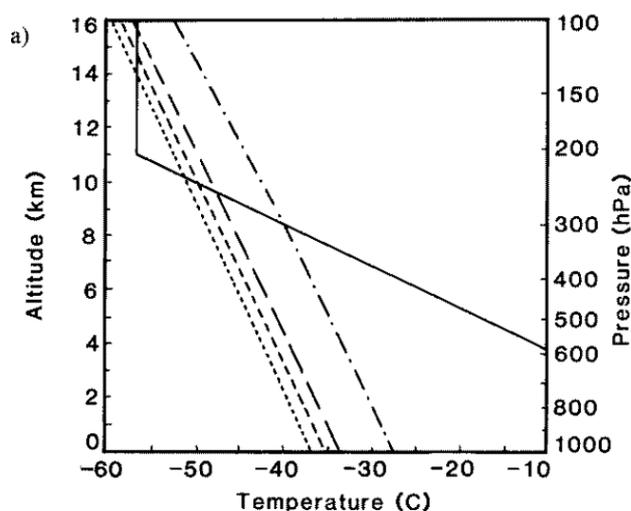
Luft lösen sich die Kondensstreifen rasch wieder auf. In sehr feuchter Luft können Kondensstreifen dagegen lange, einige Minuten bis Stunden, leben und sich am Himmel ausbreiten. Die Atmosphäre ist häufig so kalt und feucht, dass sich solch langlebige Kondensstreifen bilden, aber noch nicht feucht genug, um Zirren auf natürlichem Wege zu bilden. In solchen Fällen verursachen Flugzeuge Zirren, die sich auf natürlichem Wege nicht gebildet hätten. Mit zunehmendem Alter verlieren die Kondensstreifen ihre anfängliche linienförmige Struktur und man sieht den daraus entstandenen Zirren nicht mehr an, dass sie von Flugzeugen verursacht wurden. Zudem verändern die vom Luftverkehr emittierten Rußpartikel die Wolkenbildung. Zirrusänderungen infolge von Ruß aus Flugzeugtriebwerken wurden im Bereich dicht beflogener Luftstraßen bereits gemessen. Es ist zu erwarten, dass Ruß aus Luftverkehr Zirruswolken auch großräumig und auch noch nach Tagen verändern kann.

Soweit die Einleitung zum Thema von Prof. Dr. Robert Sausen, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Institut für Physik der Atmosphäre (<https://perma.cc/YJR4-WVJ2>).

## Das Schmidt-Appleman – Diagramm und Kriterium

### Einleitung

Ob sich Kondensstreifen bilden oder nicht kann aus dem **Schmidt-Appleman-Diagramm (SAD)** abgelesen werden (Bild 1). Aufgetragen sind Höhe (Ordinate links) und Druck (Ordinate rechts). Die Physik der Atmosphäre richtet sich nach dem Druck. Die Höhe steht dem Druck also nur als Höhe nach der Internationalen Standardatmosphäre (ISA) – bezogen auf mittlere Breiten – gegenüber zum leichteren Ablesen. Auf der Abszisse ist die Temperatur aufgetragen. Im Diagramm befinden sich diagonale Linien für die relative Feuchte. Liegen Bedingungen aus Druck und Temperatur vor links von einer Feuchtelinie, dann wird sich ein Kondensstreifen bilden. Bedingungen rechts von einer Feuchtelinie führen nicht zu einem Kondensstreifen. Nach der ISA wird der Druck aus dem Temperaturverlauf berechnet. Die Wertepaare sind als durchgezogene Linie im SAD eingezeichnet.



**Bild 1:** Schmidt-Appleman Diagramm (SAD) mit Linien der relativen Luftfeuchtigkeit von 0 % (punktiert), über 30 %, 60 % bis 100 % (strichpunktiert). Ein Zustand (Druck, Temperatur) rechts von einer Feuchtelinie führt nicht zum Kondensstreifen; links von der Linie gibt es einen Kondensstreifen. Die ISA-Bedingungen im Diagramm zeigt die durchgezogene Linie. Das Diagramm wurde für die Verbrennung von Kerosin erstellt und für einen Triebwerkswirkungsgrad von 0,3 (<https://elib.dlr.de/32128>).

Dem SAD (Bild 1) können einige **allgemeingültige Aussagen** entnommen werden. Unter ISA-Bedingungen kann es unter ca. 8,5 km Höhe keine Kondensstreifen geben. Bedenkt man, dass die relative Luftfeuchtigkeit in der Stratosphäre gering ist (sicher unter 30 %), dann kann es über 14,5 km auch keine Kondensstreifen geben. Kondensstreifen sind damit auf Flughöhen zwischen 8,5 km und 14,5 km beschränkt. Dies schießt aber die Flughöhe um 11 km (Tropopause) ein, in der viel geflogen wird.

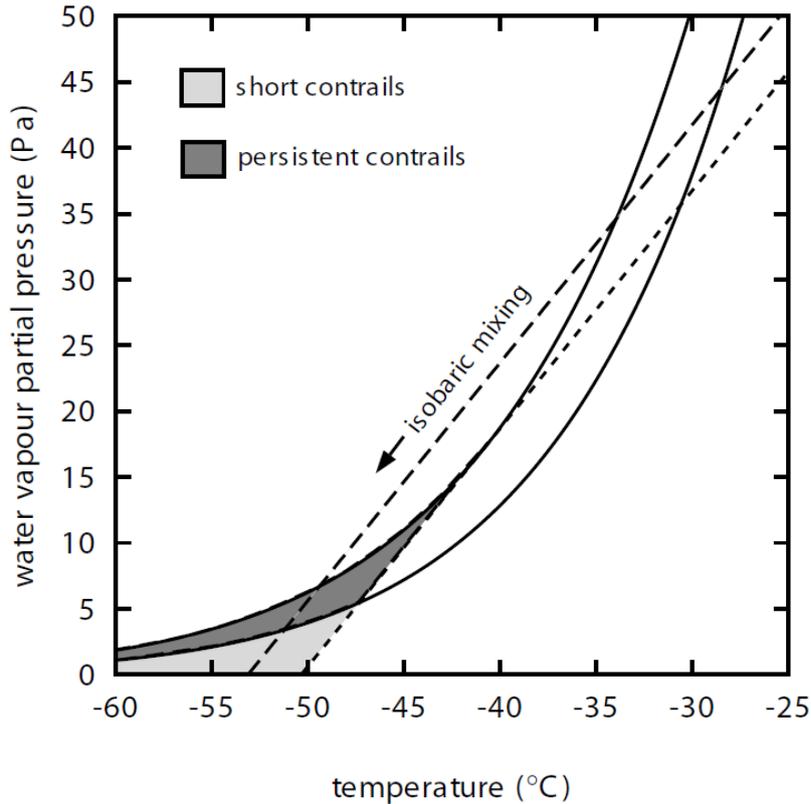
### Das Schmidt-Appleman-Kriterium

Das SAD wird durch mehrfache Anwendung des Schmidt-Appleman-Kriteriums (Bild 2) erstellt. **Das Schmidt-Appleman-Kriterium** wird viel zitiert, ist aber nicht so leicht verständlich. Aufgetragen ist in dem Diagramm der Partialdruck,  $p_D$  des Wasserdampfes (water vapor partial pressure). Gearbeitet wird eigentlich mit der relativen Feuchtigkeit,  $\varphi$ . Mit  $p_D$  ist das Diagramm aber vom Druck unabhängig und hat so Vorteile in der täglichen Arbeit. Es gilt allgemein

$$\varphi = \frac{p_D}{p_S(t)} = \frac{p_D}{E_w(t)} .$$

$\varphi$  ist die relative Feuchtigkeit.  $E_w(t) = p_S(t)$  ist der **Sättigungsdampfdruck** ("über Wasser"), also über einer Wasseroberfläche gemessen.  $E_i(t)$  ist der Sättigungsdampfdruck ("über Eis") gemessen.

Wenn das Abgas das Strahltriebwerk verlässt, dann beginnt ein **Mischungsprozess** des heißen Abgases mit der kalten Umgebungsluft. Die Abkühlung verläuft (so die Erklärung) linear. Dazu wird ein idealisierter Prozess angenommen. Es wird angenommen, dass die Abgase in der Atmosphäre zur Ruhe kommen und dann ihre kinetische Energie vollständig abgegeben haben. In Bild 2 bewegt man sich mit dem sich abkühlenden Abgas von weit oben (außerhalb des Diagramms) bis nach unten links im Diagramm (in Pfeilrichtung entlang der gestrichelten Linie), bis das Abgas sich vollständig mit der Luft in der Atmosphäre vermischt hat. Der Phasenverlauf (Druck und Temperatur) des Gemisches aus Abgasen und Umgebungsluft ist diese eine Gerade. Verschiedene Abkühlungen sind denkbar. Verläuft die Abkühlung über eine Gerade, die den Sättigungsdampfdruck "über Wasser" nur in einem Punkt berührt, so gibt das die wärmste Temperatur an, bei der die Bildung eines Kondensstreifens gerade noch möglich ist.



**Bild 2:** Das Schmidt-Appleman Kriterium ergibt, ob es zu einer Kondensstreifenbildung kommt oder nicht – nach dem hier gezeigten Diagramm (<https://doi.org/10.2174/1874282300802010001>).

**Kondensstreifen** sind dann **langlebig (persistent)**, und können sich zu Kondensstreifenzirren ausbreiten, wenn der Endzustand der Abgase in einem mit Eis übersättigten Gebiet (Ice-Supersaturated Region, ISSR) endet. In Bild 2 ist der Zustand der langlebigen Kondensstreifen in dunkelgrau gekennzeichnet. Andernfalls ist der Kondensstreifen kurz und hat nur eine Lebensdauer von wenigen Minuten. Dies ist im Diagramm in hellgrau dargestellt. Der Übergang von kurz- zu langlebig ist in Wirklichkeit sicher kontinuierlich.

Zusammenfassung: Das Abgas verlässt das Flugzeug heiß und feucht. Es kühlt sich ab und vermischt sich mit der Umgebungsluft. Das Abgas wandert durch das Diagramm nach unten, entlang der gestrichelten diagonalen Linie. Die Richtung entlang der Geraden ist im Diagramm durch einen Pfeil gekennzeichnet.

Die Steigung,  $G$  der Geraden ist aus der Literatur bekannt.

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

mit üblichen Parametern für Kerosin:

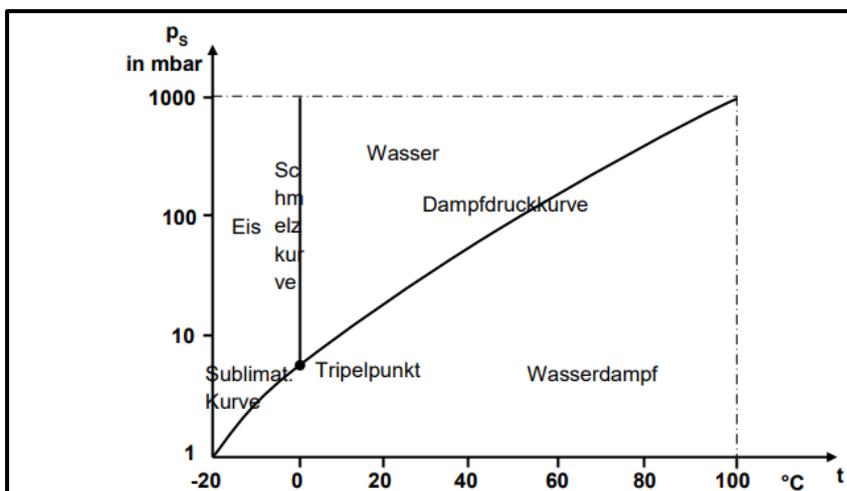
EI_H2O	1,25
c_p	1004 J/(kgK)
eps	0,622
Q	4,30E+07 J/kg
eta	0,35

Dies sind die **Eingangsparameter** in die Gleichung für  $G$ . Werte sind oben angegeben.

- $EI_{H_2O}$  ist der Emissionsfaktor (emission index) und sagt wieviel kg Wasser je kg Kerosin frei wird.
- Der Druck,  $p$  ist von der Höhe abhängig.
- $c_p$  ist die spezifische Wärmekapazität.
- $Q$  ist die Energiemenge in einem kg Kraftstoff.
- $eps$  oder  $\epsilon$  ist das Verhältnis der Molmassen von Wasser und trockener Luft.
- $eta$  oder  $\eta$  ist der Wirkungsgrad von den Triebwerken (0,3 bis 0,4).

Wenn wir den Punkt kennen, wo wir im Diagramm enden auf der Geraden, dann wissen wir auch, welchen Weg die Abkühlung genommen hat und ob dabei Wasserdampf auskondensiert ist (und einen Kondensstreifen gebildet hat). Einen **Kondensstreifen kann es nur geben, wenn** die Abkühlung auf einer Geraden stattgefunden hat, die sich auf oder links von der Tangente befindet. Wenn die Atmosphärenbedingungen (Endstadium der Abkühlung) so sind wie im dunkelgrauen Bereich (recht feucht und kalt), dann haben wir langlebige Kondensstreifen (persistent contrails). Wenn der Partialdruck des Wasserdampfes (water vapor partial pressure) geringer ist (weniger feucht), dann lösen sich die Kondensstreifen in der trockenen Luft auf. Wenn es wärmer ist (rechts von der Tangente), dann ist es zu keinem Zeitpunkt während der Abkühlung zur Kondensation des Wassers im Abgas gekommen und damit nicht zu einem Kondensstreifen.

Allgemeiner und auch für höhere Temperaturen sind die **Phasenübergänge des Wassers** in Bild 3 gezeigt. Diese Ergänzung nur um das Verständnis zu erhöhen.



**Abb. 8. 2:** p,t Diagramm für Wasser

Anhand des p,t – Diagramms für Wasser kann der Zustand der feuchten Luft wie folgt präzisiert werden:

- ungesättigte feuchte Luft:  $p_D < p_S(t)$   
Luft enthält überhitzten Wasserdampf.
- gesättigte feuchte Luft:  $p_D = p_S(t); t > t_{tr}$   
Luft enthält gesättigten Wasserdampf und Nebeltröpfchen.
- gesättigte feuchte Luft:  $p_D = p_S(t); t < t_{tr}$   
Luft enthält gesättigten Wasserdampf und Eisnebel.

Das Zweistoffsystem feuchte Luft ist im ungesättigten Zustand ein homogenes einphasiges System, im gesättigten Zustand ein heterogenes System mit einer festen oder flüssigen Phase.

**Bild 3:** Das p,t Diagramm für Wasser und feuchte Luft (<https://perma.cc/G5HC-DGW8>).

Bild 4 zeigt die Magnus-Formel(n) für die beiden Kurven im Schmidt-Appleman-Kriterium. Die Korrekturfaktoren (Bild 5) für feuchte Luft sind nahe eins. Ich habe die Korrekturfaktoren im ersten Schritt weggelassen.

## Berechnung des Sättigungsdampfdrucks von Wasser über die Magnus-Formel [\[ Bearbeiten | Quelltext bearbeiten \]](#)

Der Sättigungsdampfdruck für **Wasserdampf** in reiner Phase (Abwesenheit von Luft) kann mit Hilfe der von der **WMO** empfohlenen **Magnus-Formel** berechnet werden.<sup>[8][7]</sup> Diese Formel hat den Vorteil, dass sie nur drei Parameter benötigt und umkehrbar ist. Es gibt aber genauere Formeln.

- Über ebenen Wasseroberflächen

$$E_w(t) = 6,112 \text{ hPa} \cdot \exp\left(\frac{17,62 \cdot t}{243,12 \text{ °C} + t}\right) \quad \text{für} \quad -45 \text{ °C} \leq t \leq 60 \text{ °C}$$

- Über ebenen Eisoberflächen

$$E_i(t) = 6,112 \text{ hPa} \cdot \exp\left(\frac{22,46 \cdot t}{272,62 \text{ °C} + t}\right) \quad \text{für} \quad -65 \text{ °C} \leq t \leq 0 \text{ °C}$$

**Bild 4:** Die Magnus-Formel (<https://de.wikipedia.org/wiki/Sättigungsdampfdruck>).

## Korrekturfaktoren für feuchte Luft [\[ Bearbeiten | Quelltext bearbeiten \]](#)

Die Korrekturfaktoren (engl.: *enhancement factor*) sind nötig, da der Wasserdampf nicht in reiner Form vorliegt, sondern innerhalb der feuchten Luft. Sie gelten lediglich bei einem Luftdruck von 1013,25 hPa (Normaldruck). Bei höheren Drücken sind sie größer und dementsprechend bei niedrigeren Drücken kleiner.

1. über Wasser im Temperaturintervall von  $-50 \text{ °C}$  bis  $90 \text{ °C}$ :  $f_w = 1,00519 \pm 0,00108$
2. über Eis im Temperaturintervall von  $-90 \text{ °C}$  bis  $0 \text{ °C}$ :  $f_i = 1,00686 \pm 0,00235$

Da die Korrekturfaktoren temperaturabhängig sind und in den obigen Werten recht große Temperaturintervalle umfassen, stellen sie nur recht grobe Näherungen an die tatsächliche Abweichung dar. Die negativen Temperaturen über Wasser beziehen sich auf unterkühltes Wasser.

Um die resultierenden Werte für den Sättigungsdampfdruck zu erhalten, gilt:

1.  $E'_w = f_w \cdot E_w$  ( $E_w$  – Tabellenwert)
2.  $E'_i = f_i \cdot E_i$  ( $E_i$  – Tabellenwert)

**Bild 5:** Korrekturfaktoren zur Magnus-Formel für feuchte Luft (<https://de.wikipedia.org/wiki/Sättigungsdampfdruck>).

**Bestimmung der Geraden im Schmidt-Appleman-Kriterium.** Von der Geraden in Bild 2

$$f(t) = G t + G_0$$

kennen wir nur die Steigung,  $G$ .  $f(t)$  ist aber die Tangente an  $E_w(t)$ . Am Berührungspunkt muss die Steigung von  $E_w(t)$  und von  $f(t)$  gleich sein. Es wird  $E_w(t)$  nach  $t$  abgeleitet und  $G$  gleichgesetzt.

$$E_w(t)' = \frac{dE_w(t)}{dt} = G \quad .$$

Daraus ergibt sich die Temperatur  $t_{SAC}$  im Berührungspunkt. Die Temperatur  $t_{SAC}$  ist die höchste Temperatur, bei der noch ein Kondensstreifen entstehen kann. Die Berechnung der Ableitung enthält Bild 6.

Weiterhin sind die Funktionswerte beider Funktionen im Berührungspunkt gleich. Wir erhalten  $G_0$  aus

$$G_0 = E_w(t) - G t$$

## Berechnung der Tangente an die Kurve $E_w(t)$

$$E_w(t) = a \cdot e^{\frac{bt}{c+t}}$$

$$\frac{dE_w(t)}{dt} = a \cdot e^{\frac{bt}{c+t}} \cdot \frac{b(c+t) - bt}{(c+t)^2}$$

$$= a \cdot e^{\frac{bt}{c+t}} \cdot \frac{bc + bt - bt}{(c+t)^2}$$

$$\frac{dE_w(t)}{dt} = \frac{abc \cdot e^{\frac{bt}{c+t}}}{(c+t)^2}$$

$\stackrel{!}{=} G$

$G$

$$\underline{f(t) = G \cdot t + G_0}$$

Lösen der Gleichung

$$\frac{abc \cdot e^{\frac{bt}{c+t}}}{(c+t)^2} - G = 0$$

$t$  ist die Temperatur, in der sich die Kurve  $E_w(t)$  und die Gerade  $f(t)$  berühren. Dies ist die Temperatur

$T_{SAC}$ : SAC threshold temperature

SAC: Schmidt-Appleman Criterion.

Bild 6: Berechnung der Ableitung von  $E_w(t)$ .

Die **Nullstelle** der in Bild 6 gezeigten Gleichung wird in Excel mit dem Solver gefunden.

Einen Screenshot der Excel-Tabelle zeigt Bild 7. **Download der Excel-Tabelle** über <https://purl.org/aero/SAC>.

Bild 8 zeigt das berechnete Diagramm zum Schmidt-Appleman-Kriterium.

Kondensstreifen in Luft mit einer relativen Feuchte,  $\varphi$

$$\frac{E_i(t)}{E_w(t)} \leq \varphi \leq 1$$

gelten als persistent. Aus der Grenzkurve (Bild 9)

$$\varphi = \frac{E_i(t)}{E_w(t)}$$

wird die mindestens erforderliche relative Feuchtigkeit ersichtlich.

**Schmidt-Appleman-Criterion**

a_w	611,2 Pa
b_w	17,62
c_w	243,12 °C
a_i	611,2 Pa
b_i	22,46
c_i	272,62 °C
t	-48,7 °C
E_w - G	-2,2757E-06 Pa/°C
E_w	7,39 Pa
E_i	4,61 Pa
k_a	6,8756E-06 1/ft
k_b	4,8063E-05 1/ft
k_exp	5,25588
H_T	36089 ft
p_0	101315 Pa
p_T	22632 Pa
H	50000 ft
p	11597 Pa
EI_H2O	1,25
c_p	1004 J/(kgK)
eps	0,622
Q	4,30E+07 J/kg
eta	0,35
G	0,837 Pa/°C
GO	48,2 Pa/°C

**Magnus-Equation**

$$E_w(t) = 6,112 \text{ hPa} \cdot \exp\left(\frac{17,62 \cdot t}{243,12 \text{ °C} + t}\right)$$

$$E_i(t) = 6,112 \text{ hPa} \cdot \exp\left(\frac{22,46 \cdot t}{272,62 \text{ °C} + t}\right)$$

$$E_w(t) = a_w e^{\frac{b_w t}{c_w + t}}$$

$$E_i(t) = a_i e^{\frac{b_i t}{c_i + t}}$$

[https://de.wikipedia.org/wiki/Sättigungsdampfdruck#Berechnung\\_des\\_Sättigungsdampfdrucks\\_von\\_Wasser\\_über\\_die\\_Magnus-Formel](https://de.wikipedia.org/wiki/Sättigungsdampfdruck#Berechnung_des_Sättigungsdampfdrucks_von_Wasser_über_die_Magnus-Formel)  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Vapour\\_pressure\\_of\\_water](https://en.wikipedia.org/wiki/Vapour_pressure_of_water) contains also alternative equations

No contrail above this temperatur  
 <= drive to Zero with the Solver

Constants of the ISA, Scholz

Input of the flight altitude

Pressure from the ISA, Scholz

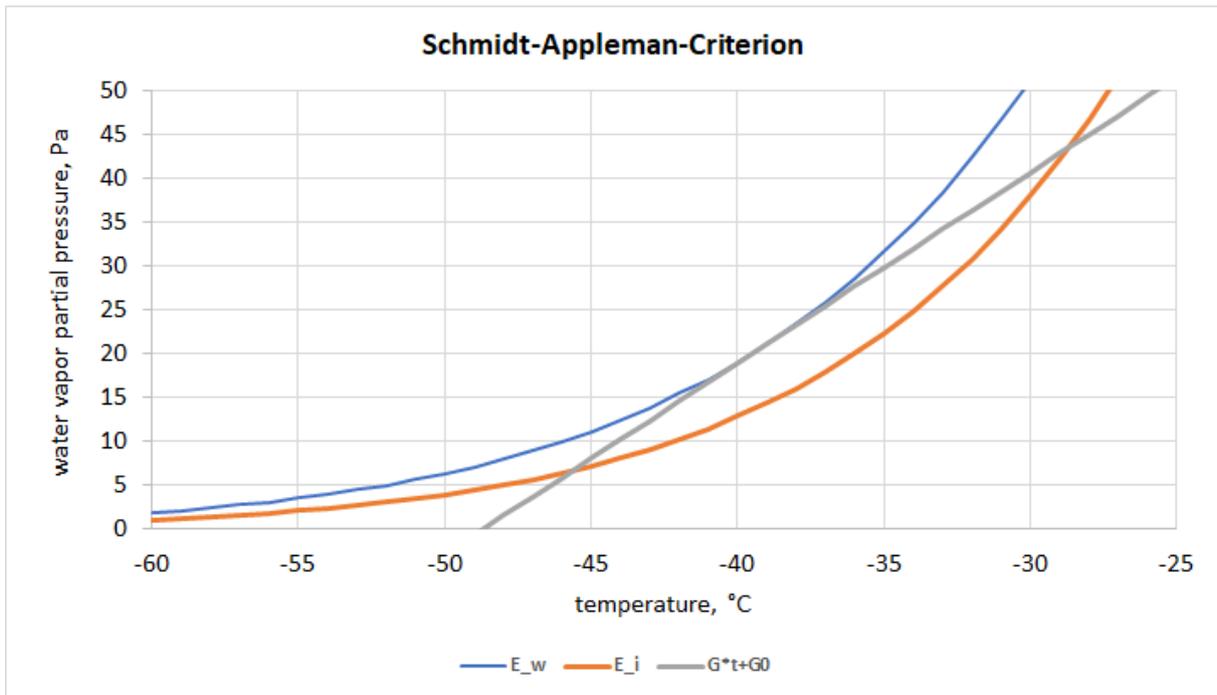
Data for Kerosine

$$G = \frac{EI_{H2O} p c_p}{\epsilon Q (1 - \eta)}$$

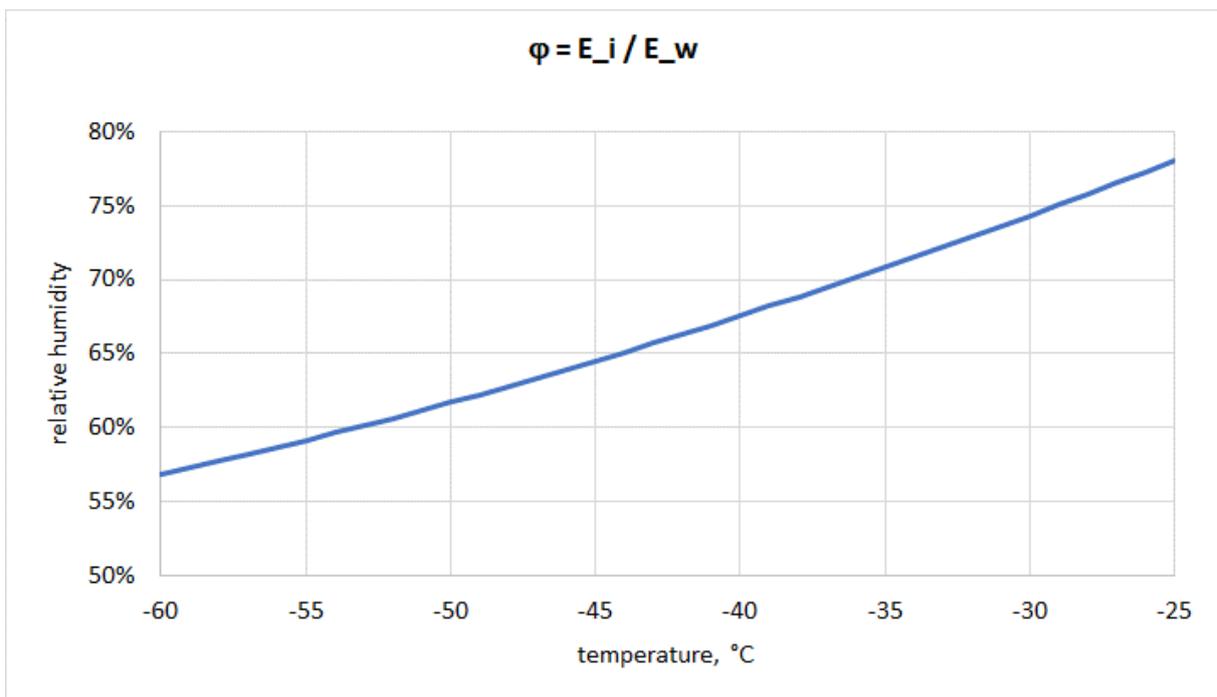
GIERENS, Klaus, et al., 2008. A Review of Various Strategies for Contrail Avoidance. In: OASC, vol.2, pp. 1-7.  
<https://openatmosphericssciencejournal.com/VOLUME/2>

= a\_w \* b\_w \* c\_w \* EXP(b\_w \* t / (c\_w + t)) / (c\_w + t) ^ 2 - G  
 = a\_w \* EXP(b\_w \* t / (c\_w + t))  
 = a\_i \* EXP(b\_i \* t / (c\_i + t))  
 = EI\_H2O \* p \* c\_p / (eps \* Q \* (1 - eta))  
 = E\_w - G \* t

**Bild 7:** Screenshot des Excel-Tools zur Berechnung der Kondensstreifen nach Schmidt-Appleman.



**Bild 8:** Berechnung zum Schmidt-Appleman-Kriterium hier für eine Flughöhe,  $H = 30000$  ft,  $p = 30087$  Pa.



**Bild 9:** Grenzkurve für die mindestens erforderliche relative Feuchtigkeit für persistente Kondensstreifen.

## Constructing the Schmitd-Appleman-Diagram

Constructing the SAD

An aircraft flies at altitude,  $H$   
and air temperature,  $t$ .

At what relative humidity does it  
get contrails?

$$G \cdot t + G_0 = p \cdot E_w(t)$$

$$p = \frac{G \cdot t + G_0}{E_w(t)}$$

exact approach  
with Solver

to be limited: If:

$$Gt + G_0 < 0 \Rightarrow p < 0\% \downarrow$$

$$t > t_{SAC} \Rightarrow p > 100\% \downarrow$$

$$t_{SAC,100} = t_{SAC} \quad \text{from tangent and Solver}$$

$$Gt + G_0 = 0 \quad 0\% \text{ relative humidity}$$

$$t_{SAC,0} = t = -\frac{G_0}{G}$$

$$\text{Def: } \Delta t_{tot} = t_{SAC,100} - t_{SAC,0}$$

} all functions  
of altitude

Experience shows:

$$t_{SAC} = a_H \cdot t_{SAC} + b_H \quad \text{Regression from SAD}$$

$$(a) \quad \Delta t_{tot} = a_{tot} \cdot H + b_{tot} \quad \text{--- " ---}$$

Moving down to lower temperatures from  $t_{SAC}$   
requires only less rel. humidity,  $p$  for contrails.

$$(1) \quad \Delta p = a_t(H) \cdot \Delta t^{b_t} \quad \text{Regression from SAD}$$

For  $\Delta p = 1$  (going to  $p = 0\%$ ):

$$(2) \quad a_t(H) = \frac{1}{\Delta t_{tot}^{b_t}}$$

$\Delta t_{tot}$  from (a) or (b).  
(a): simpler, sufficient.

These equations are only the summary.

Calculations are included in the Excel file: <https://purl.org/aero/SAC>

Here find further details there.

$$(3) \quad \underline{\Delta t = t_{SAC} - t}$$

From  $H_{SAC} = a_H \cdot t_{SAC} + b_H$  follows:

$$(4) \quad \underline{t_{SAC} = \frac{H_{SAC} - b_H}{a_H}}$$

Combining (1) with (2), (3), (4):

$$(5) \quad \boxed{\Delta p = \frac{1}{\Delta t_{tot}^{b_t}} \left[ \frac{H_{SAC} - b_H}{a_H} - t \right]^{b_t}}$$

$$p = 1 - \Delta p$$

approximation  
± 4% points  
deviation in  
rel. humidity

ICAO temperature is written in this form:

$$t = t_0 - L \cdot H$$

The saturation temperature is likewise from SAC:

$$t_{SAC} = t_{SAC,100} = t_{SAC,0,100} - L_{SAC,100} \cdot H$$

Similar also regression from SAC:

$$\underline{t_{SAC,0} = t_{SAC,0,0} - L_{SAC,0} \cdot H}$$

Based on the definition of  $\Delta t_{tot}$  another eq.:

$$(b) \quad \underline{\Delta t_{tot} = t_{SAC,0,100} - t_{SAC,0,0} - (L_{SAC,100} - L_{SAC,0}) \cdot H_{SAC}}$$

Constructing a SAD with  
Iso-Lines of rel. humidity, P

From (1)  $\Delta p = a_t(H) \cdot \Delta t^{b_t}$ ;  $\Delta p = 1 - P$

$$\Delta t = \left[ \frac{\Delta p}{a_t(H)} \right]^{1/b_t}$$

Intersections of the temperature  
 $t = f(H)$  with the Lines  $t_{SAC,100} = f(H)$   
and  $t_{SAC,0} = f(H)$

- a) Intersections in the troposphere  
(Now generalised for the 0% or 100% Lines)

$$t_{SAC} = t_{SAC,0} - L_{SAC} \cdot H = t_0 - L \cdot H$$

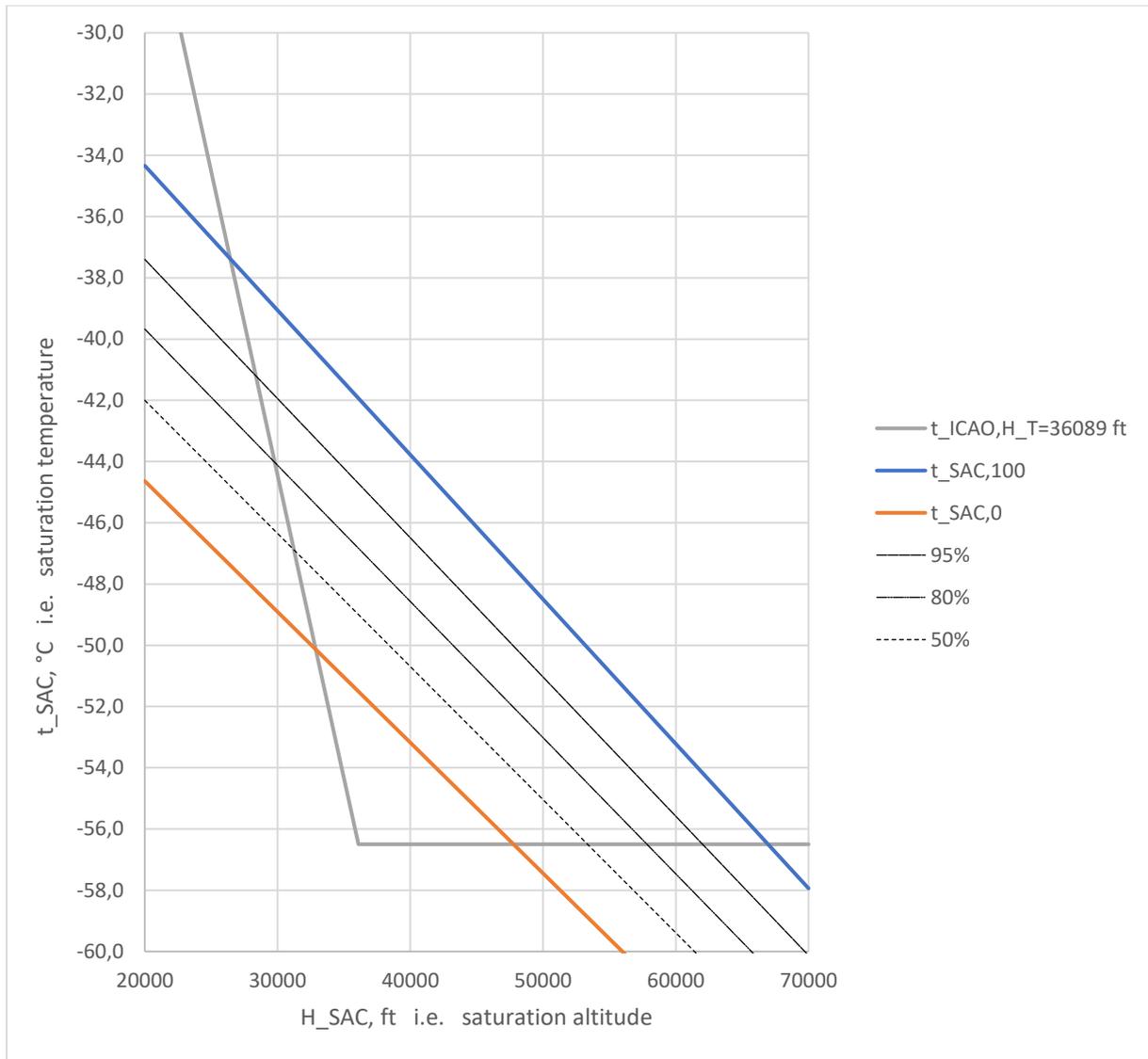
$$L \cdot H - L_{SAC} \cdot H = t_0 - t_{SAC,0}$$

$$H = \frac{t_0 - t_{SAC,0}}{L - L_{SAC}}$$

- b) Intersections in the stratosphere

$$t_T = t_{SAC,0} - L_{SAC} \cdot H$$

$$H = \frac{t_{SAC,0} - t_T}{L_{SAC}}$$



**Bild 10:** Schmidt-Appleman-Diagram from own calculation (<https://purl.org/aero/SAC>)

## Flight Planning

### Avoiding of Warming Contrails – Fostering Cooling Contrails

1.) **Check, if flight is over clouds.**

=> Do nothing (contrail does not change anything)

2.) Otherwise, no clouds: **Check, if daytime** (06:00 and 15:00 UTC).

=> Do nothing (contrail may be cooling)

3.) Otherwise, nighttime or nighttime very soon: **Check, if NO persistent contrail.**

=> Do nothing (no contrail or only short-lived contrail does not change much)

4.) Otherwise, persistent contrail:

=> Avoid contrail (!!!)

Check cruise altitude and **decide, if flying higher (or rather lower) than SSR avoids contrail.**

=> Select new FL (for part of the route)

AND adapt speed for optimum lift coefficient (calculated from density at new FL).

a) Middle Latitudes: Check flying below (above may be too high).

b) Equator: Only below SSR is feasible.

c) Poles: Flying above SSR may be an option.

5.) If envisaged FL is unfeasible:

=> **Check if flying around SSR is feasible.**

=> Plan new route according to Relative Humidity (RH).

6.) If new route is unfeasible:

=> **Ignore warming contrail** (on that part of your flight).

#### Hints:

- Relative humidity for contrail calculation from <https://www.windy.com>
- Cloud coverage for contrail calculation from <https://www.windy.com>
- Check different Weather Models
- Aircraft data: Outside Air Temperature (OAT), Altitude from <https://globe.adsbexchange.com>

## The Rich-Quench-Lean (RQL) Combustor – Causing More Contrails than Average

Teoh (2022) made an important observation when looking at the influence of nvPM emissions (non-volatile particulate matter, i.e. soot):

*In particular, while one specific **very large wide-body aircraft** is only used in 2.4 % of all flights, it accounted for 18.0 % (6.4 %) of flights with strongly warming (cooling) contrails. Comparing the effects of different aircraft types shows that 43.4 % (17.4 %) of flights with strongly warming (cooling) contrails are powered by one engine combustor type, the "phase 5 rich–quench–lean combustor" (Rolls-Royce), which has one of the highest nvPM EIn.*

**While RQL designs have helped to drastically reduce NOx emissions, they tend to be prone to nvPM formation due to the especially rich combustion found in their primary zones.**

(<https://orca.cardiff.ac.uk/id/eprint/153029>)

Rolls-Royce Trent 1000 (B787) has a Phase 5 RQL Combustor.

Pratt & Whitney has developed the TALON family of RQL combustor for commercial aircraft gas turbine engines.

(<https://dspace.lib.cranfield.ac.uk/handle/1826/12499>)

PW4000 has a TALON combustor ("Technology for Affordable Low NOx" is also RQL-Tehnolog).

The PW4000 is used on A300-600, A310-300, **B747-400**, B767, ...

([https://en.wikipedia.org/wiki/Rolls-Royce\\_Trent\\_1000](https://en.wikipedia.org/wiki/Rolls-Royce_Trent_1000))

*The impressive development of Phase 5 (RQL — rich/quench/lean) combustor technology that has enabled these reductions to be achieved. Research into the concept began in the late 1980s and was certificated on the Trent 700 and 800 in 1995 and 1996 respectively. Since then a steady flow of improvements in wall cooling, fuel spray nozzles, internal mixing and overall combustor geometry has enabled NOx emissions to be progressively reduced, the LTO NOx of the Trent 900, for example, being 20% lower than that of the 800 at a similar thrust. Phase 5 technology has now been successfully introduced across the fleet, including all members of the Trent and RB211 family, BR700 and AE3007, and has an exemplary service record. A dedicated Phase 5 improvement programme is now [2009] underway for application to future engines. This is expected to yield further reductions in NOx from Phase 5 combustors within a 2016 timeframe but these are unlikely to meet the CAEP LTTG of 45% relative to CAEP 6.*

(Greener by Design, RAeS

<https://www.aerosociety.com/media/15464/greener-by-design-annual-report-2008-2009.pdf>)

**Airbus A380 uses the Trent 970 and Trent 972 engine from Rolls-Royce with RQL combustor.**

([https://en.wikipedia.org/wiki/Airbus\\_A380](https://en.wikipedia.org/wiki/Airbus_A380))

## List of References

TEOH, R., SCHUMANN, U., GRYSPEERDT, E., SHAPIRO, M., MOLLOY, J., KOUDIS, G., VOIGT, C., STETTLER, M. E. J., 2022. Aviation contrail climate effects in the North Atlantic from 2016 to 2021. In: *Atmospheric Chemistry and Physics*, vol. 22, no. 16, pp. 10919–10935.

Available from: <https://doi.org/10.5194/acp-22-10919-2022>.

---

This Memo is being extended ...