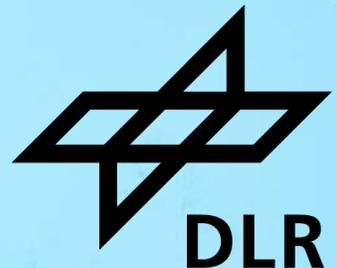


DEKADISCHE TRENDS VON EISÜBERSÄTTIGUNG AUS DER SATELLITENPERSPEKTIVE

Klaus Gierens (DLR) und Kostas Eleftheratos (N.K.U. Athen)



HELLENIC REPUBLIC
National and Kapodistrian
University of Athens
— EST. 1837 —



DLR

Gliederung

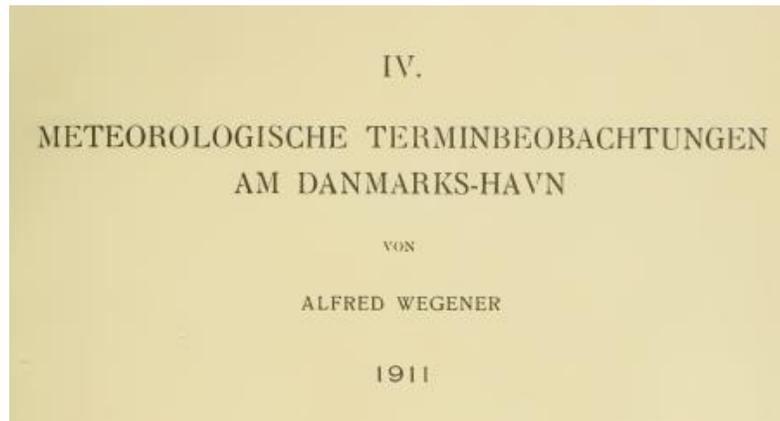


- Einleitung (warum interessiert uns ISS und deren dekadische Trends?)
- Einiges zu Eisübersättigung und eisübersättigten Regionen
- Upper-tropospheric humidity (wrt ice): die Satellitenperspektive
- Trendanalyse
- Zusammenfassung

EINLEITUNG

Motive, sich mit Eisübersättigung zu befassen

- ist ein **thermodynamischer Zustand**, der in der Atmosphäre vorkommt:
 - $e_i \geq e_i^*$; $RH_i \geq 100\%$; generell wird auch $T \leq 235 \text{ K}$ verlangt
 - zum ersten Mal 1906 von Wegener dokumentiert (Grönlandexpedition), aber lange Zeit ignoriert (von Radiosonden nicht gemessen, in NWP-Modellen nicht repräsentiert)

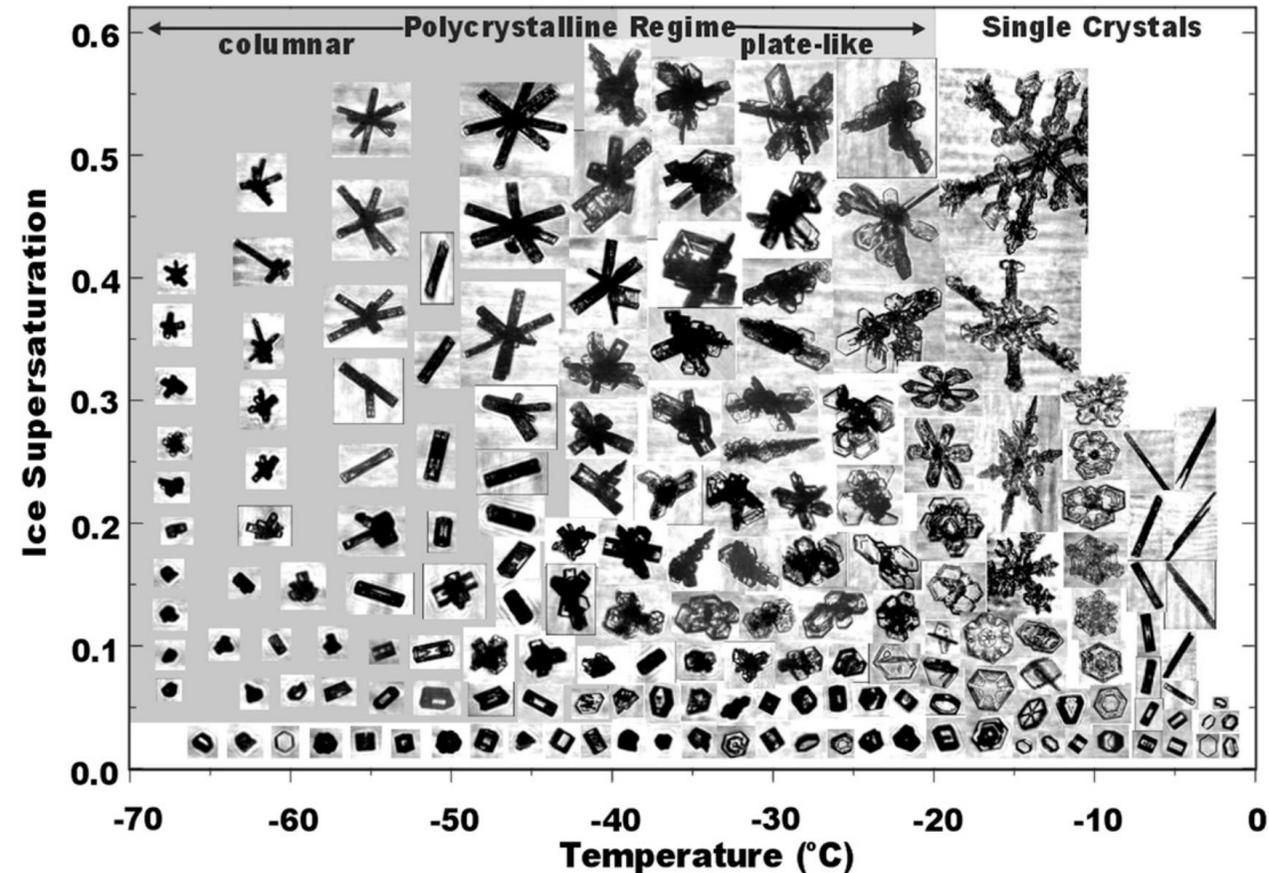


160 ALFRED WEGENER Danmarks-Havn													Meteorologische Terminbeobachtungen am Danmarks-Havn. 161																		
Datum	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	November 1906.																	
	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	Mittel													
Ref. Feucht.	51	68	71	89	92	91	—	—	112	110?	75	80	105	68	81	—	—	104?	109?	105?	85?	99?	71?	82?	106?	100	110	91	112	91	
(Haarhygro-	63	50	74	90	96	—	—	90	110	110?	75	100	100	76	95	110	—	66?	110?	108?	110?	90?	90?	65?	86?	112	110	106	100	105	92
meter)	61	65	81	95	88	—	—	94	112?	109?	86	107	88	71	105	—	—	105?	112?	105?	100?	89?	65?	65?	94?	110	110	86	96	106	93
% Tg. Mitt.	60	61	77	91	92	91	—	92	111	110	79	96	98	72	91	110	—	86	109	107	105	88	85	67	87	109	107	101	96	108	92

Aus diesen Zahlen geht zur Evidenz hervor, dass zur kältesten Jahreszeit, nämlich in den Monaten November bis März, im Durchschnitt die Luft in Bezug auf Eis erheblich übersättigt ist. Es kann

Motive, sich mit Eisübersättigung zu befassen

- Eisübersättigung ist *conditio sine qua non* für die Entstehung von Zirren und die Persistenz von Kondensstreifen
 - Nukleation von Eiskristallen aus festen und flüssigen Aerosolpartikeln benötigt mehr oder weniger substantielle Eisübersättigung
 - Eiskristalle sublimieren, sobald der umgebende Wasserdampf eis-untersättigt ist, aber sie wachsen bei (und nur bei) Eisübersättigung
- ⇒ Ob es in einem wärmeren Klima noch Zirren gibt, hängt von der zeitlichen (dekadischen) Entwicklung der Eisübersättigung in der Tropopausenregion ab



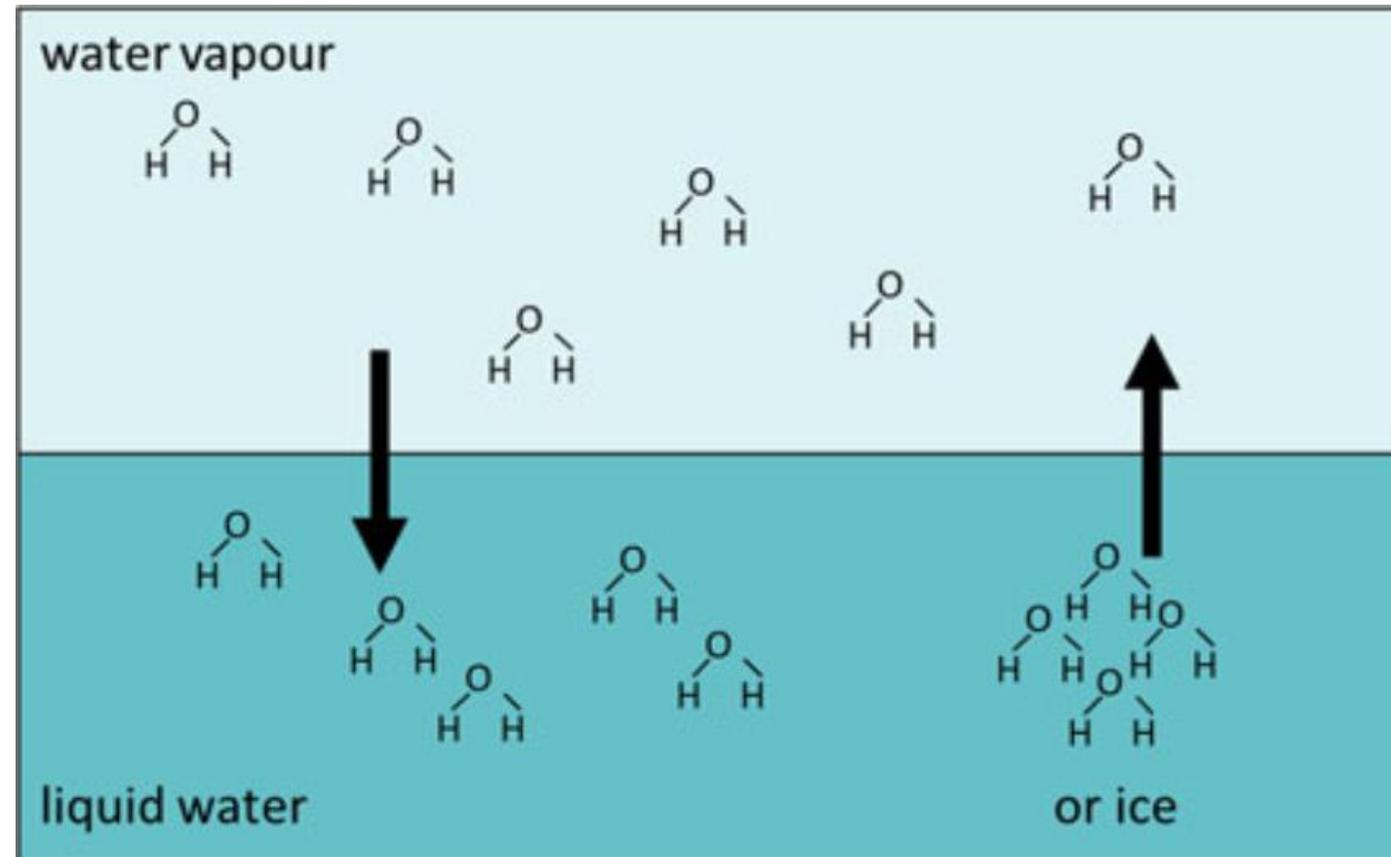
Bailey & Hallett, 2009

EISÜBERSÄTTIGUNG

Relative Feuchte und Eisübersättigung

■ Thermodynamik

- RH ist das Verhältnis von Dampfdruck zu Sättigungsdampfdruck
- Sättigung \Leftrightarrow dyn. Gleichgewicht
- RH: rel. zu flüssigem Wasser
- RH_i: rel. zu Eis
- Sättigung: RH(i)=100% per def.
- Übersättigung: $e \geq e^*$
- Regt Flüsse an, die das Gleichgewicht wieder herstellen, wenn es Senken für diese Flüsse gibt.



Relative Feuchte und Eisübersättigung

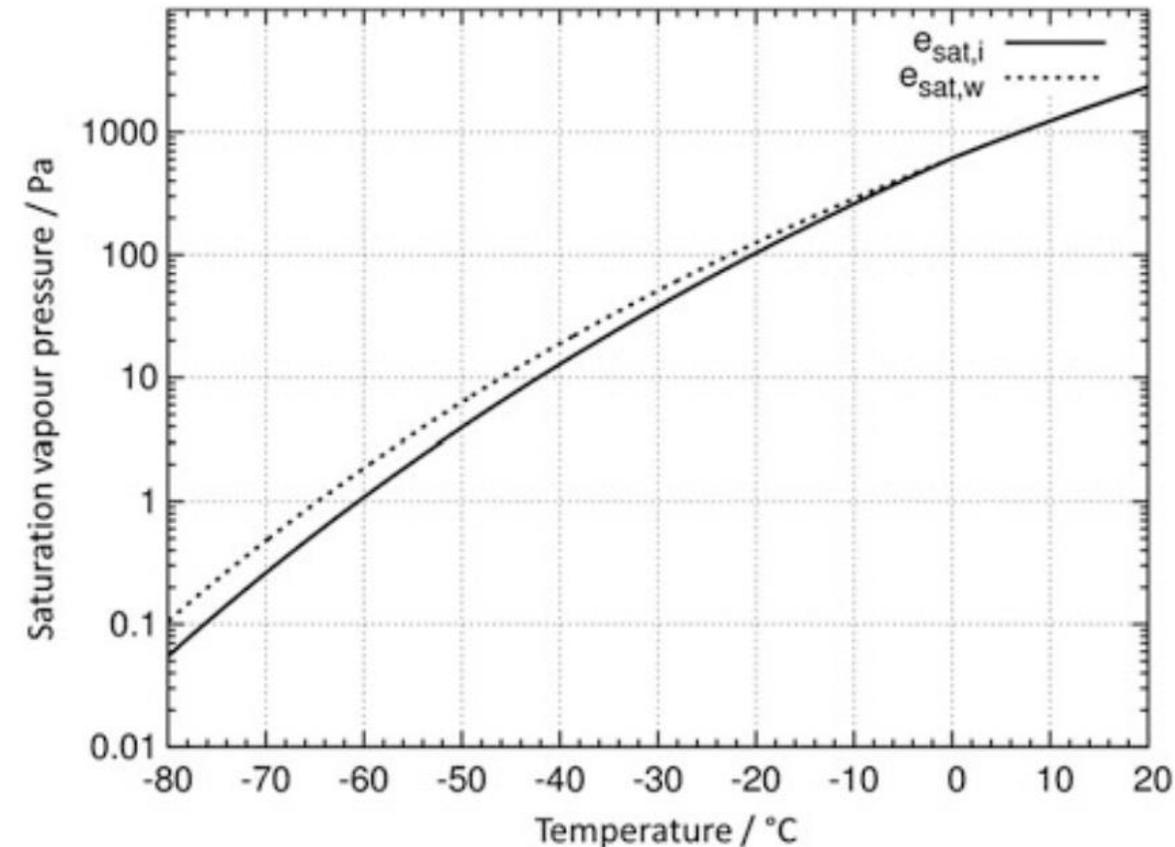
■ Thermodynamik und Dynamik

- Clausius-Clapeyron Gleichung

$$\frac{d \ln e^*}{d \ln T} = \frac{L}{RT} \Rightarrow$$

- Sättigungsdampfdruck ist stark T-abhängig
- RH(i) steigt, wenn T (und damit e^*) sinkt.

- Vertikalbewegung (Aufsteigen) mit adiabatischer Abkühlung ist die Hauptquelle von Eisübersättigung.

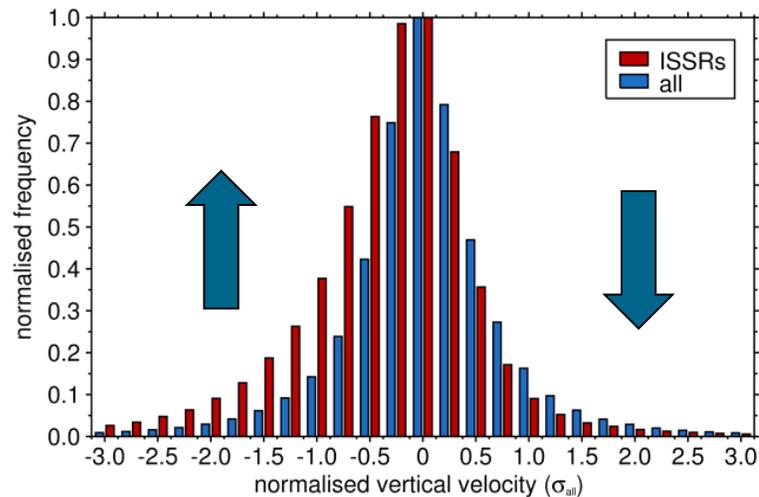


Relative Feuchte und Eisübersättigung

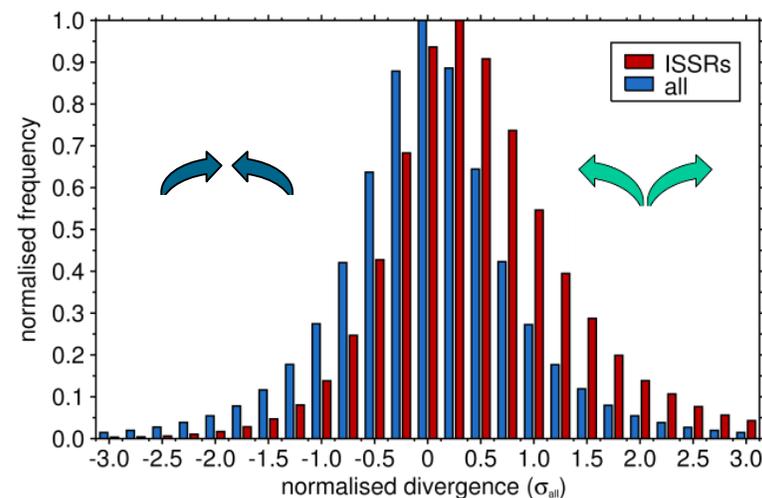
■ Dynamik (Synoptik)

- ISS tritt in bestimmten dynamischen Situationen bevorzugt auf:
- In den nördlichen Extratropen sind das aufsteigende divergente Luftbewegungen in antizyklonaler Rotation. (Gierens & Brinkop 2012, Wilhelm et al., 2022)

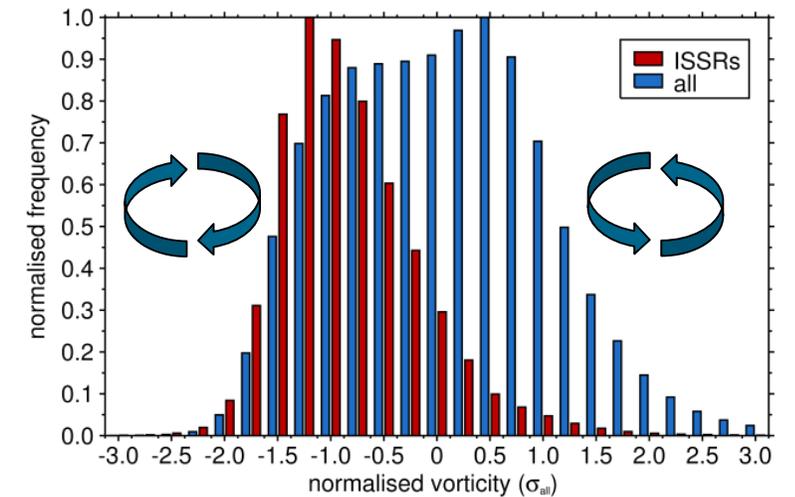
vert. velocity on 250 hPa, March 2012 (0/12 UTC), Europe



divergence on 250 hPa, March 2012 (0/12 UTC), Europe



vorticity on 250 hPa, March 2012 (0/12 UTC), Europe



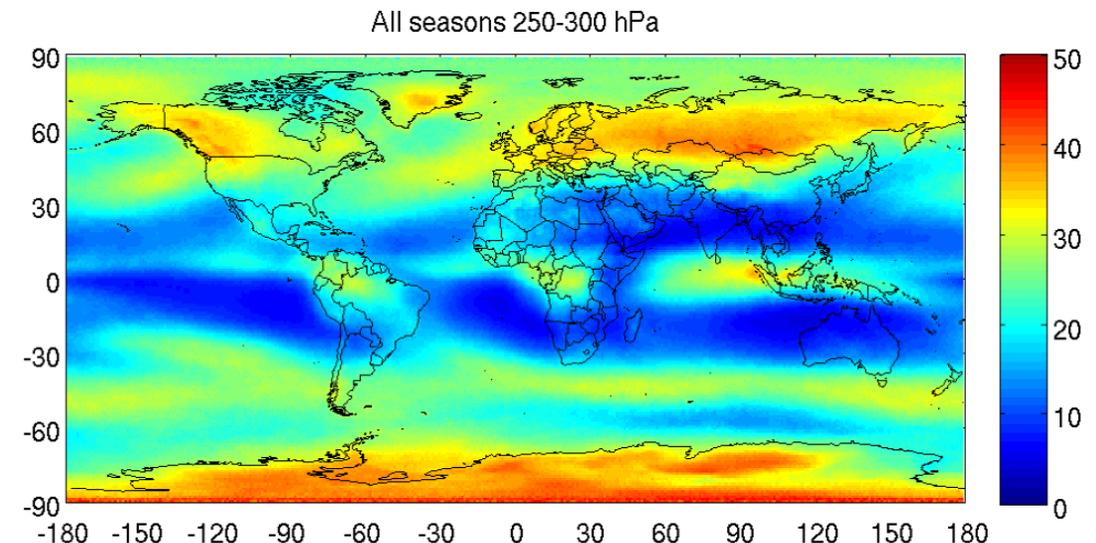
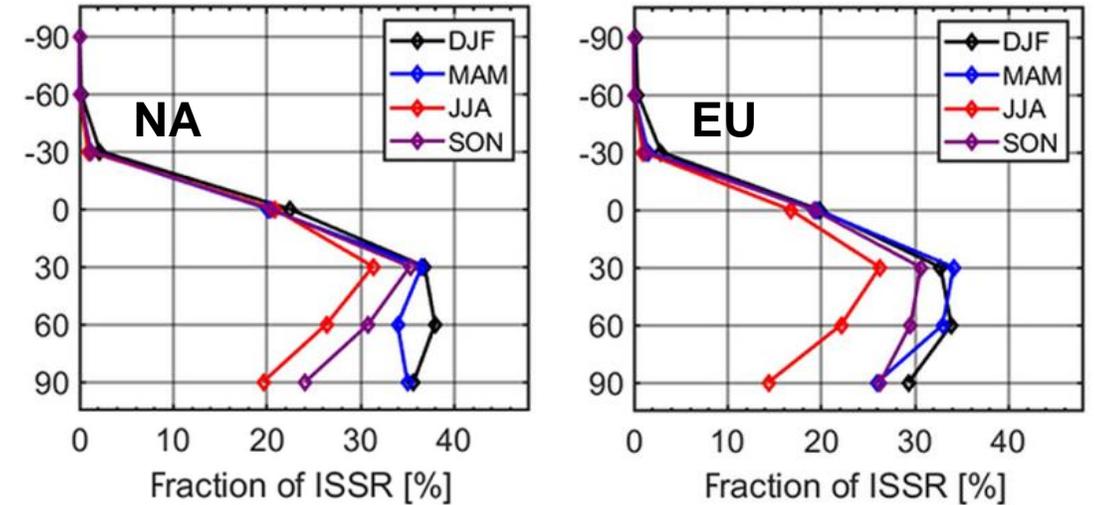
Eisübersättigte Regionen (ISSRs)

■ Klimatologie von ISSRs

- ISSRs sind am häufigsten direkt unter der Tropopause
(Petzold et al., 2020, IAGOS Daten)

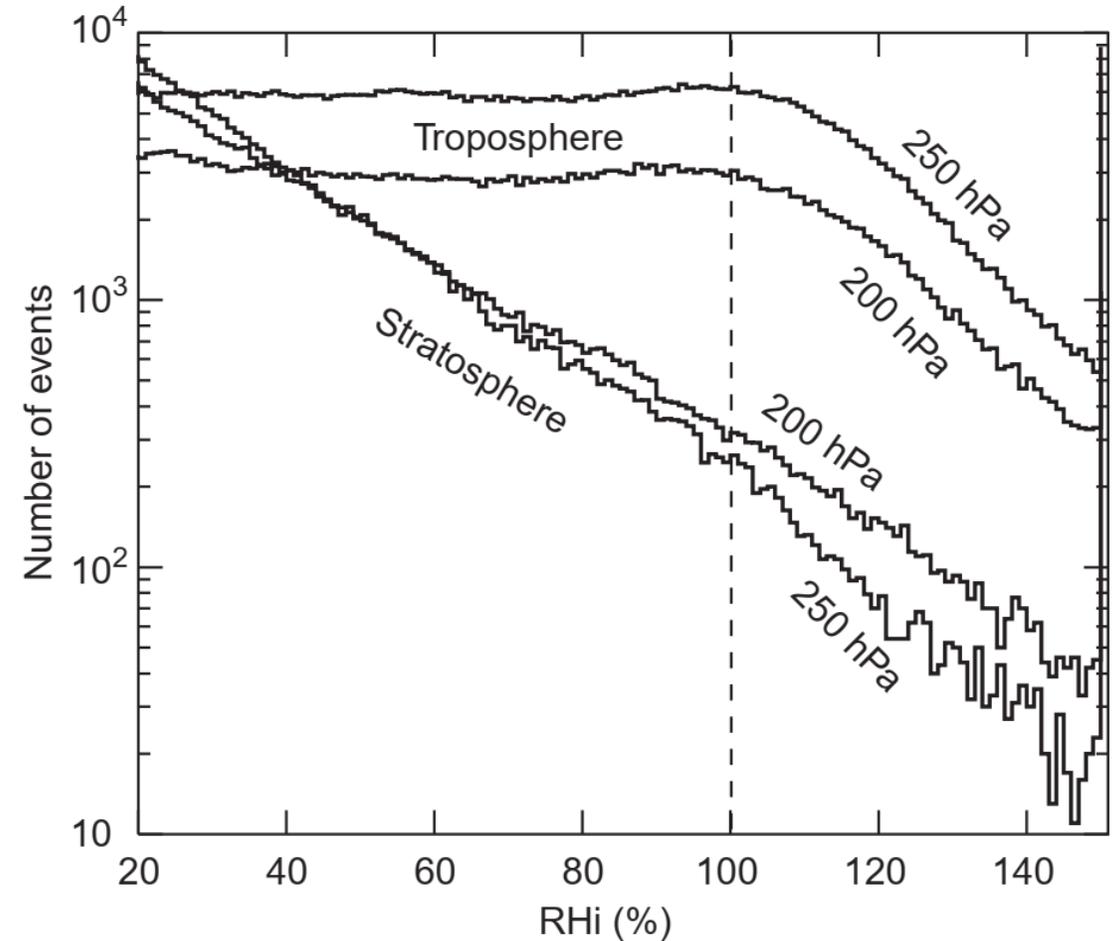
- Die horizontale Verteilung von ISSRs hängt daher von der Höhe ab, wo man die ISSRs betrachtet, und variiert saisonal.
- Über der Antarktis gibt es eine Besonderheit

(Lamquin et al., 2012, AIRS Daten)



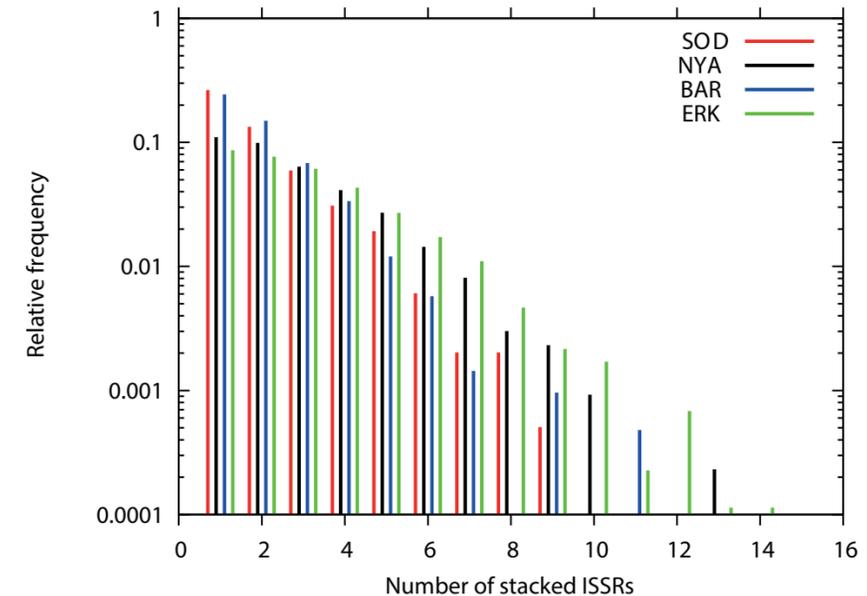
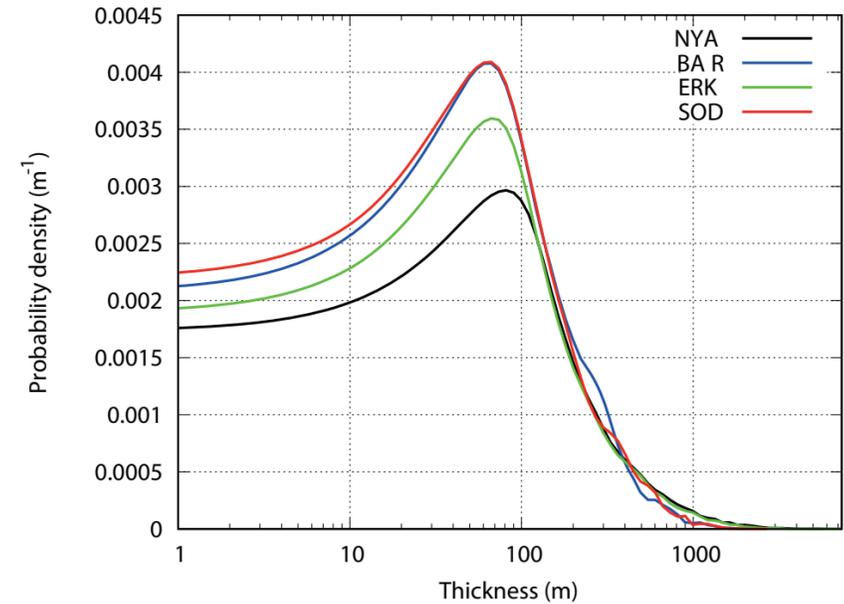
Statistische Verteilung der relativen Feuchte in ISSRs

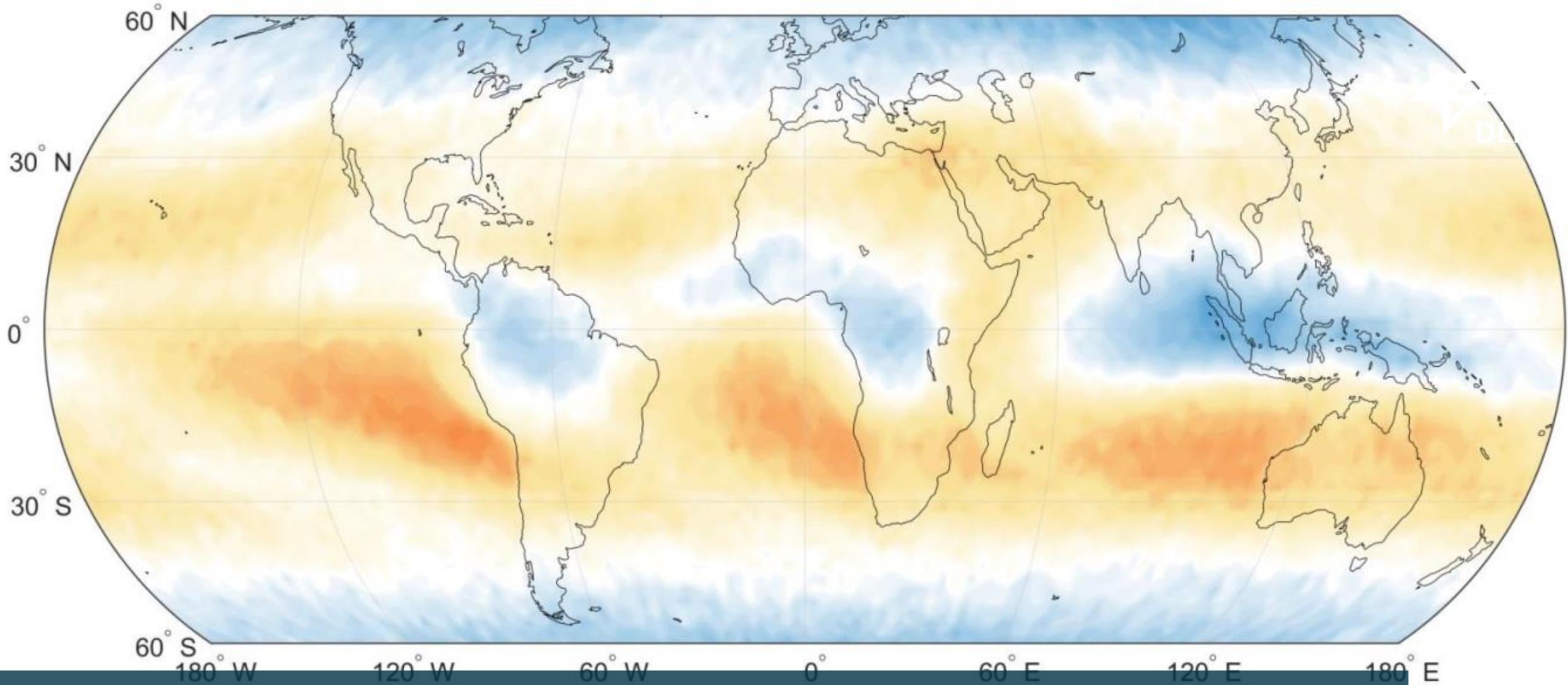
- Messungen mittels Sensoren auf Verkehrsflugzeugen (MOZAIC/IAGOS Projekt).
 - Troposphäre: Gleichverteilung für $RHi < 100\%$,
 - Exponentialverteilung für ISSRs.
 - Stratosphäre: durchgängig exponentiell verteilt.
 - Stochastisches Modell: sehr viele gleichzeitige Prozesse, die unabhängig voneinander H_2O -Moleküle verbrauchen oder freisetzen (Gierens et al., 1999)



Satellitenrelevante Eigenschaften von ISSRs

- Dickenverteilung und Detektionswahrscheinlichkeit
 - mittlere Dicke ein paar 100 m.
 - Detektionswahrscheinlichkeit hängt davon ab, wie groß der Anteil an ISS in der vom weighting-kernel erfaßten Schicht ist.
 - Aber ISSRs sind häufig vertikal gestapelt und damit insgesamt dicker als einzelne ISS Schichten.
 - Gierens et al., MZ, 2020





UPPER-TROPOSPHERIC HUMIDITY

0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100

UTHi (%)

Bedeutung von UTH(i)



- UTH(i) ist eine Strahlungsgröße, die aus gemessenen Brightness-temperaturen berechnet wird (**Schmetz und Turpeinen**, 1988, haben den Begriff eingeführt).
- UTH(i) ist als **gewichtetes Mittel über ein Profil von RH in einer relativ dicken Schicht der oberen Troposphäre** interpretierbar, wenn gewisse Kriterien vom Retrieval erfüllt werden.
- Diese Kriterien sind:
 - Werte von UTH sollten z.w. 0 und 100%, Werte von $UTH_i \geq 0$ sein.
 - Bei einem konstanten RH(i)-Profil sollte UTH bzw. UTH_i diesen Wert annehmen.
 - Wenn RH(i) an einer Stelle im Profil zu(ab)nimmt, muß auch UTH(i) zu(ab)nehmen).
 - Das T-abhängige Verhältnis UTH_i/UTH sollte ungefähr $\frac{e_w^*}{e_i^*}$ entsprechen.
- Verschiedene Retrievals führen zu verschiedenen Versionen von UTH(i).

Bestimmung von UTH(i) aus Brightnesstemperaturen (1)



- **F. Möller** (1961) zeigt, dass Strahlung in der Wasserdampfbande von 6-7 μ m als eine Art Hygrometer verwendet werden kann.
- **Soden und Bretherton** (1993) entwickeln den ersten Retrieval-algorithmus, der auf vereinfachenden Annahmen über die T(p)-Struktur der oberen Troposphäre beruht. Damit ist eine analytische Integration der Strahlungstransportgleichung möglich.
- **Jackson und Bates** (2001) verallgemeinern den Algorithmus, so dass er nicht nur in den Tropen angewendet werden kann. Sie leiten ihn sowohl für UTH als auch für UTHi ab. Dazu wird die Brightness-Temperatur im HIRS-Kanal 6 verwendet (T₆, CO₂-Bande):

$$\frac{U}{\%} = 100 \frac{\exp(a + bT_{12})}{a' + b'T_6}$$

Bestimmung von UTH(i) aus Brightnesstemperaturen (2)



- Um die gleiche Zeit wird HIRS2 abgeschafft und durch HIRS3 ersetzt, was für die Homogenität der UTH-Zeitreihe eine Katastrophe ist.
- **Shi und Bates** (2011) korrigieren die durch den HIRS2→3 Übergang verursachten Sprünge in der T_{12} -Zeitreihe. Temperaturdifferenzen um 7K müssen ausgeglichen werden.
- **Gierens, Eleftheratos und Shi** (2014) freuen sich, dass sie eine homogene Zeitreihe haben, mit der sie prüfen können, ob die Feuchte in der oberen Troposphäre seit 1979 statistisch signifikante Änderungen erfahren hat.
- Aber:.....

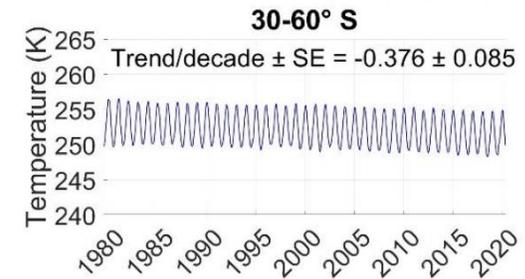
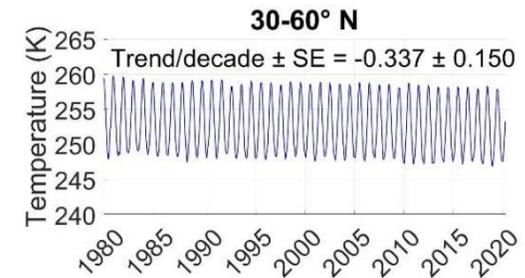
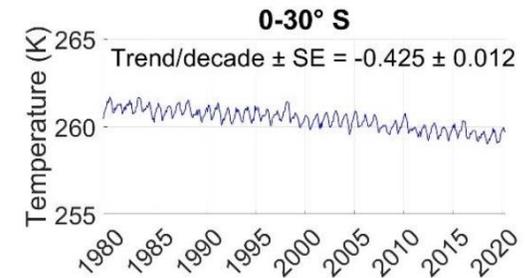
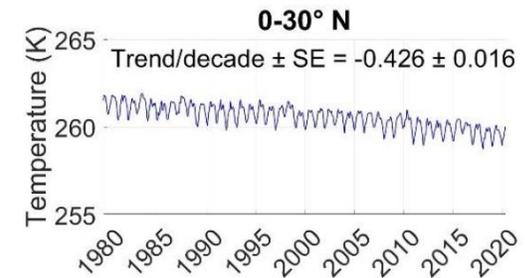
Zwei Probleme: Inhomogenität von T_6

- **Shi et al. (2016)** fanden, dass der Anstieg des $[CO_2]$ in der Atmosphäre die Brightness-Temperaturen in Kanal 6 systematisch verringert:

$$\frac{d[T_6]}{d[CO_2]} = \frac{-1.98 \text{ K}}{(410 - 330) \text{ ppmv}} = -0.02475 \frac{\text{K}}{\text{ppmv}}$$

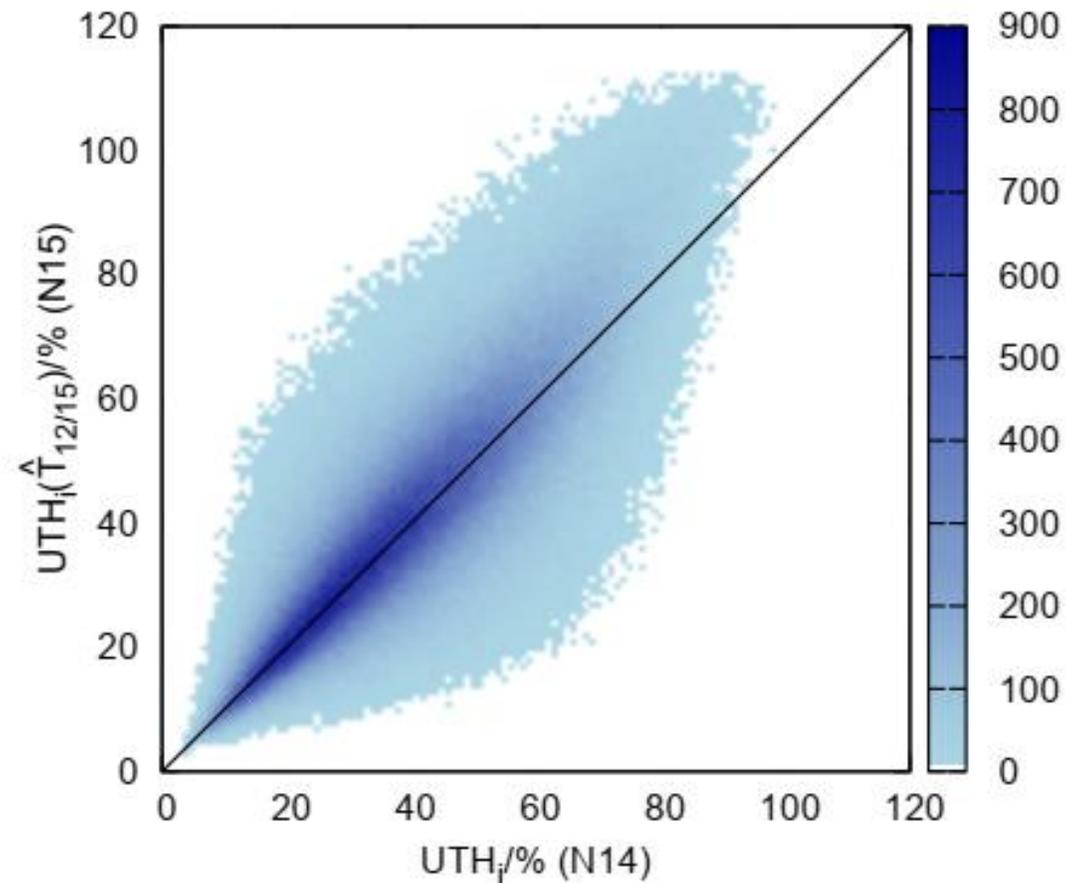
- Korrektur (auf Monatsbasis):

$$T_6'(m) = T_6(m) + |-0.02475| * ([CO_2(m) - 370])$$



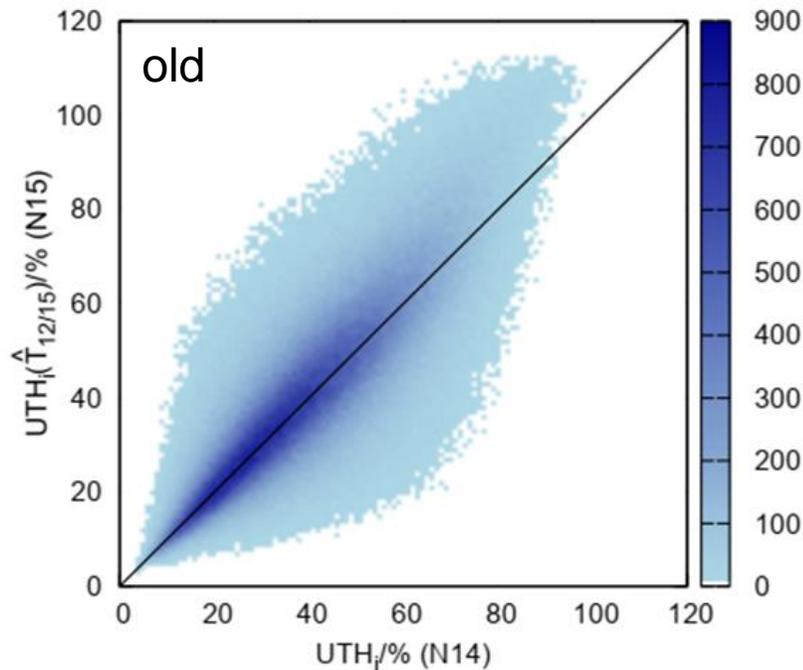
Zwei Probleme: Inhomogenität von T_{12}

- Die korrigierte T_{12} -Zeitreihe ist nur im Mittel homogen, aber nicht in den Flügeln der T_{12} -Verteilung, insbesondere nicht bei niedrigen Werten von T_{12} , die hohen Werten von $UTH(i)$ entsprechen.
(Der Übergang fand zwischen NOAA14 und NOAA15 statt, in den Jahren 1999-2005)

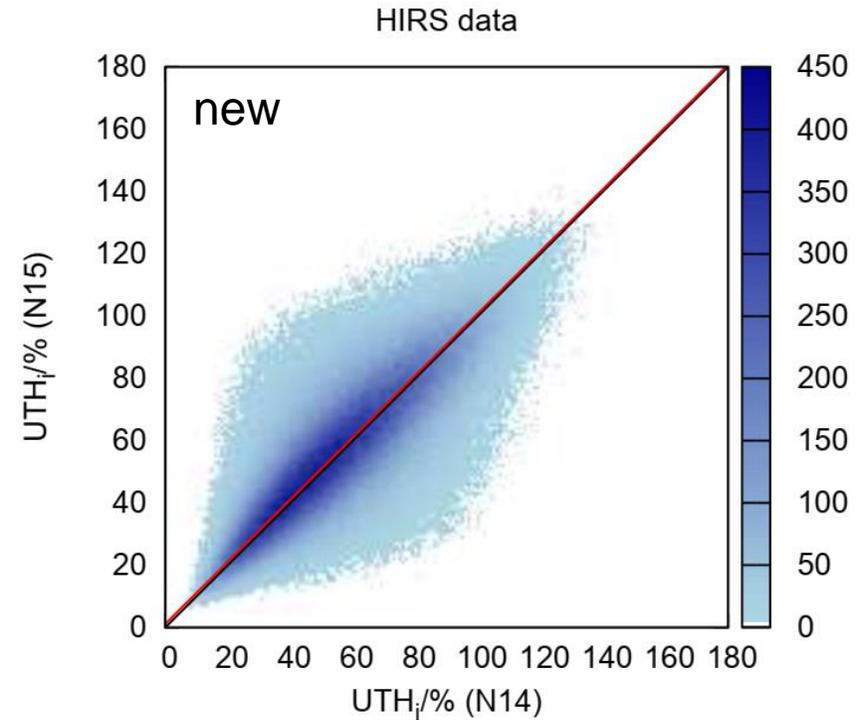


- **Gierens und Eleftheratos** (2019) entwickeln das UTH(i) Retrieval komplett neu, zwar auf der Grundlage der Arbeit von Soden und Bretherton bzw. Stephens et al., aber mit quadratischen Näherungen für $T(p)$ und $B[T(p)]$. Insbesondere verwenden sie verschiedene optische Konstanten für die verschiedenen Instrumente von HIRS2 und HIRS3/4.
- Daraus ergibt sich ein Datensatz, der auch in den Flügeln der Verteilung keine Sprünge mehr zeigt, d.h. der 7K Sprung in der T_{12} -Zeitreihe wird (fast) vollständig vermieden.

Homogenität bei hohen Werten von UTH(i)



Bitte beachten Sie die unterschiedlichen Skalen an beiden Achsen! UTH_i kann deutlich größer sein als vorher.



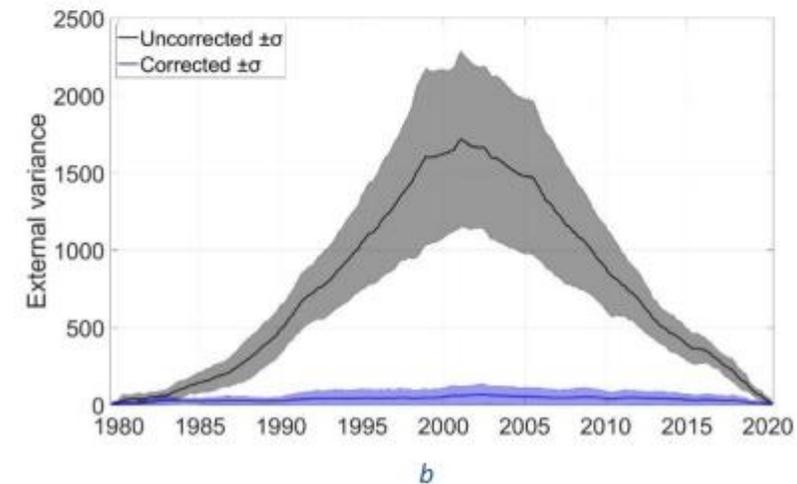
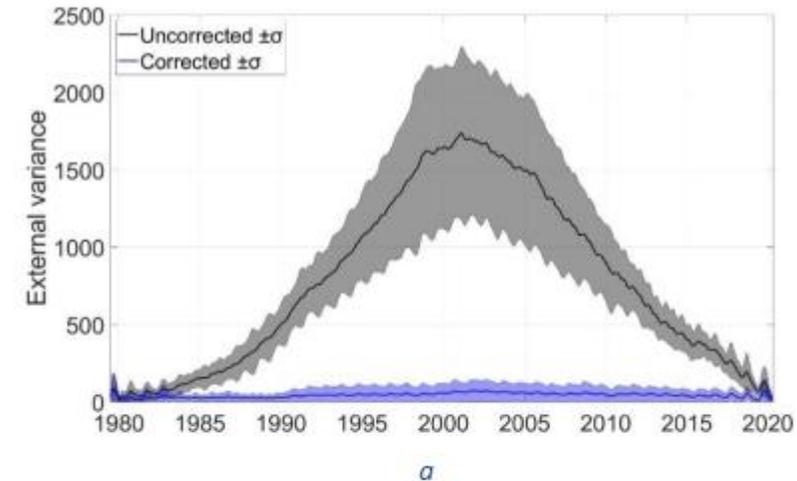
rot: Bivariate Regression

$$U_i(\text{N15})/\% = 1.17 + 0.998 U_i(\text{N14})/\%$$

Vollständige Homogenität: Voraussetzung für Zeitreihe

- Reste von Inhomogenitäten von ca. 0.1K wurden von Charis Benetatos mittels einer breakpoint-Analyse gefunden und korrigiert.
- Aufteilung der Varianz in externen und internen Anteil.

$$V_{ext} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^2 n_i (\bar{x}_i - \bar{x})^2$$



Analytische Lösungen der Strahlungstransportgleichung



- Linear (1st order):

$$I_1 = B_0 C_\lambda \beta \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(-A'_\lambda \sqrt{U} e^{(\beta\kappa+1)x/2}\right) \exp(C_\lambda \beta x) dx,$$

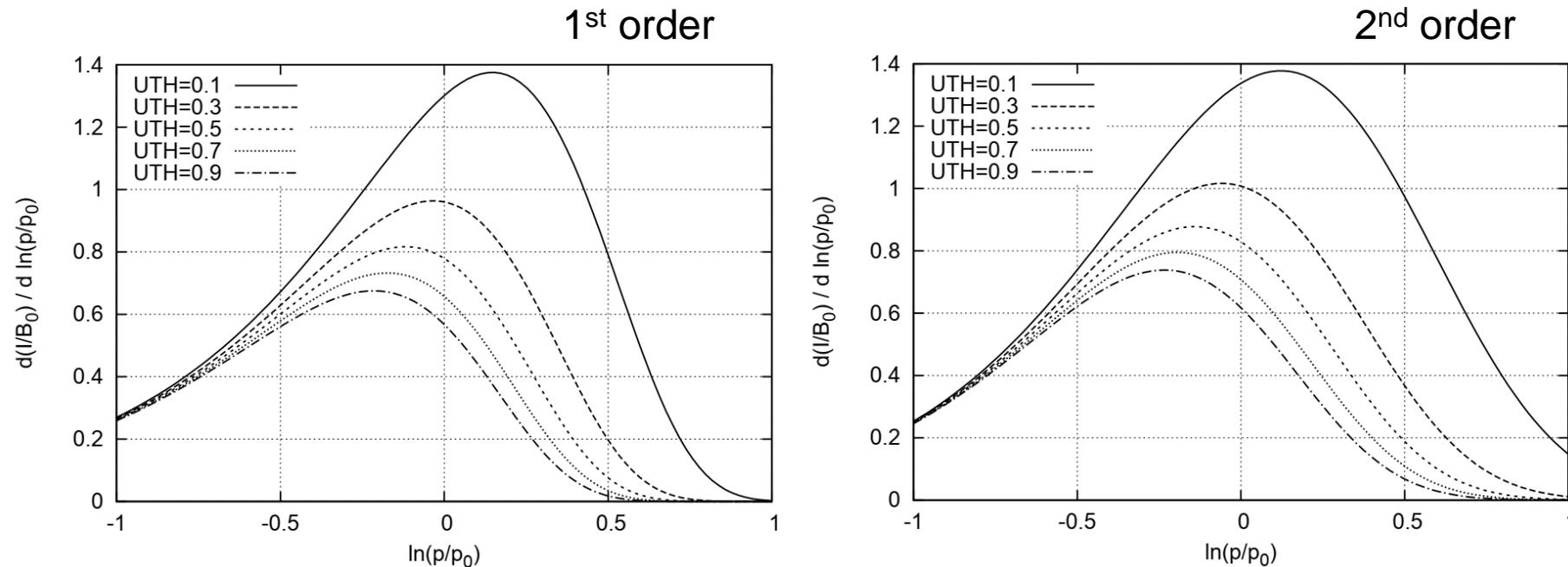
- Quadratisch (2nd order):

$$I = B_0 C_\lambda \beta \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left\{-A_\lambda \sqrt{U} [1 + \operatorname{erf}(\sqrt{\kappa}\beta x - \sqrt{\kappa}/2)]^{1/2}\right\} \exp[C_\lambda(\beta x - \beta^2 x^2)] (1 - 2\beta x) dx.$$

- UTH ist (vorläufig) die Größe U , die man einsetzen muß, damit I der gemessenen Intensität der Strahlung entspricht.

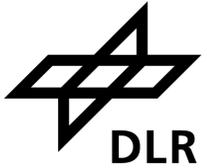
Strahlungsintegranden (normiert)

- Integranden

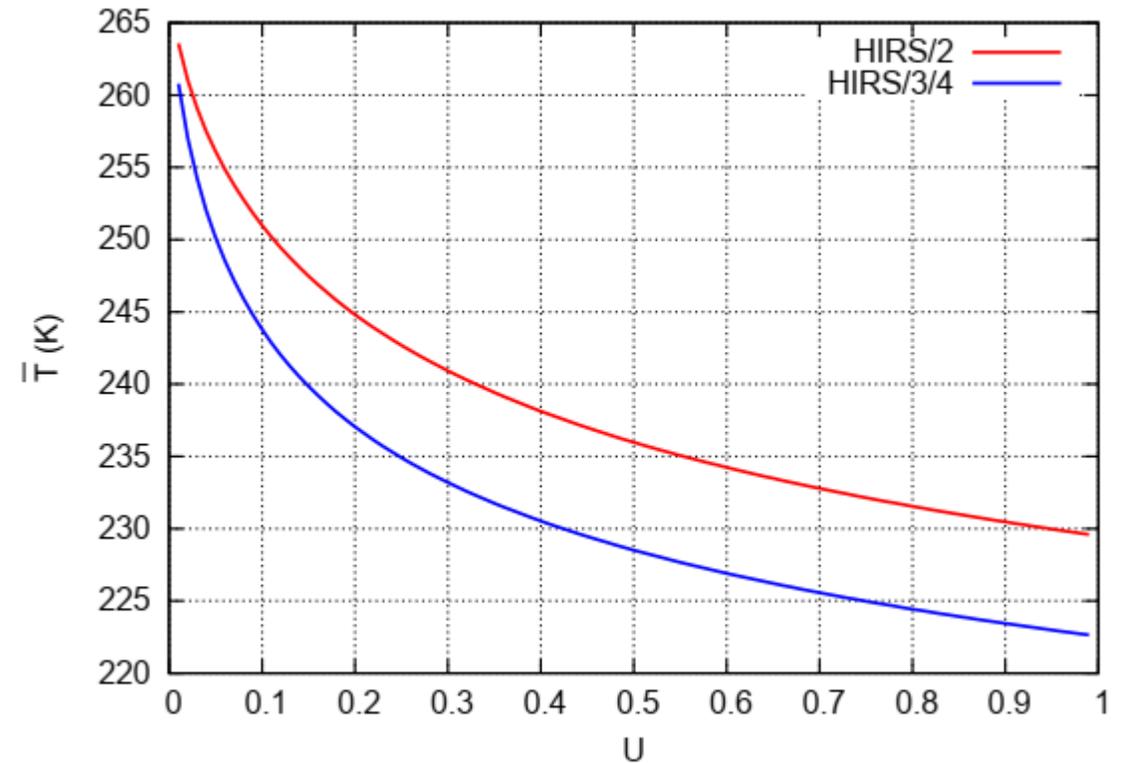
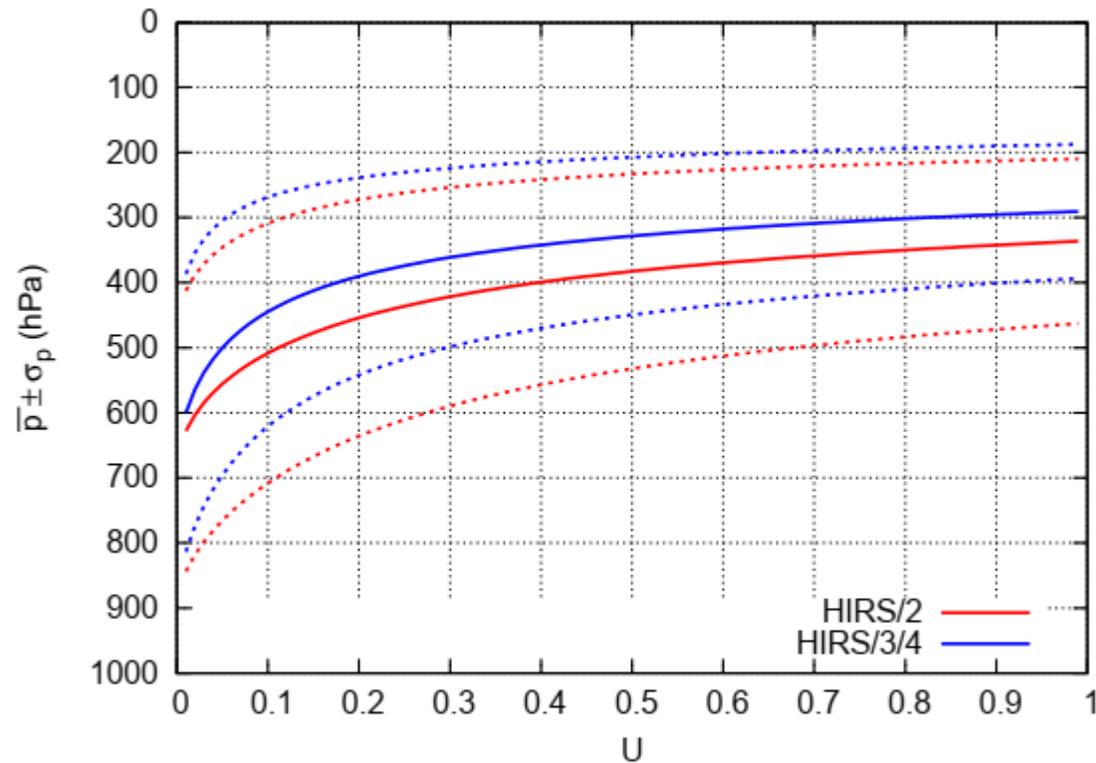


- Aus diesen Funktionen kann man **Beitrags- und Gewichtsfunktionen** als Wahrscheinlichkeitsdichten berechnen (Gierens & Eleftheratos, 2021)

Anwendungen der Beitragsfunktion (contribution fct.)



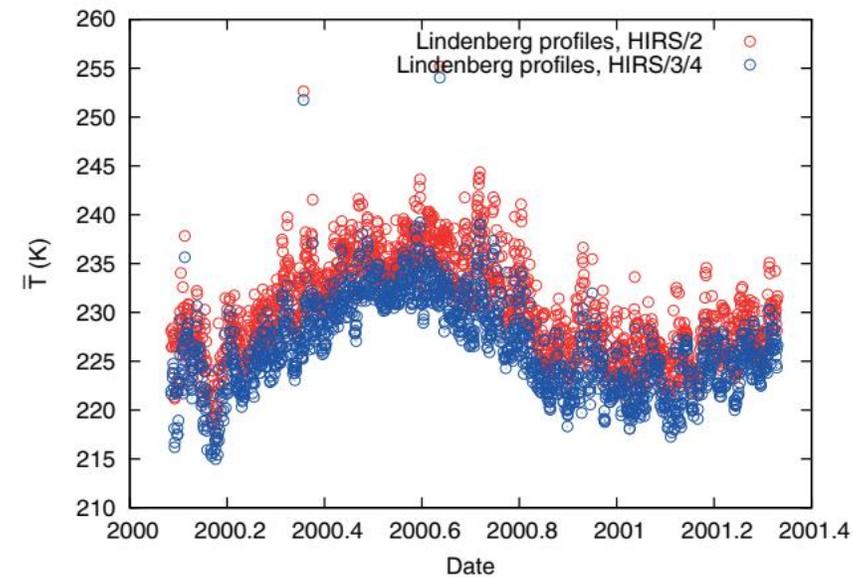
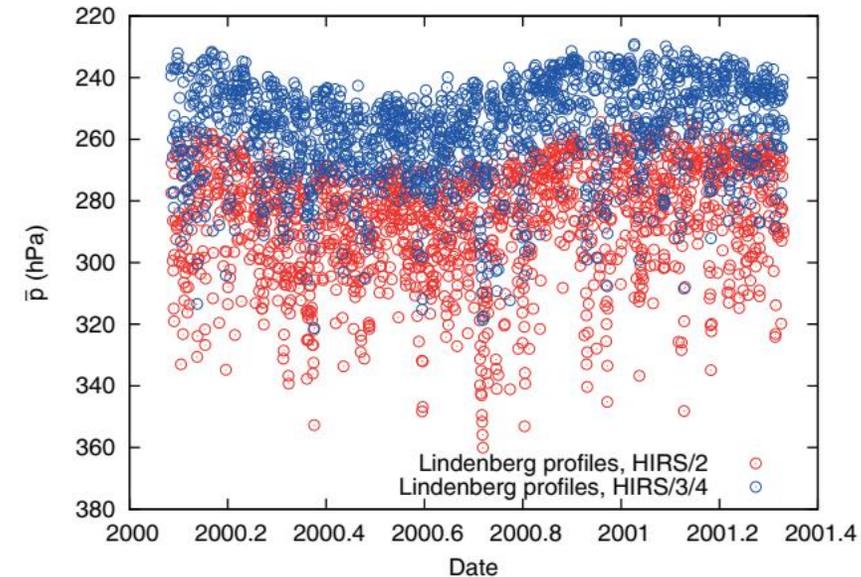
- Wo kommen die Photonen her? Welche Temperatur herrscht dort?



(Gierens & Eleftheratos, 2021)

Anwendung auf Radiosondenprofile (Lindenberg)

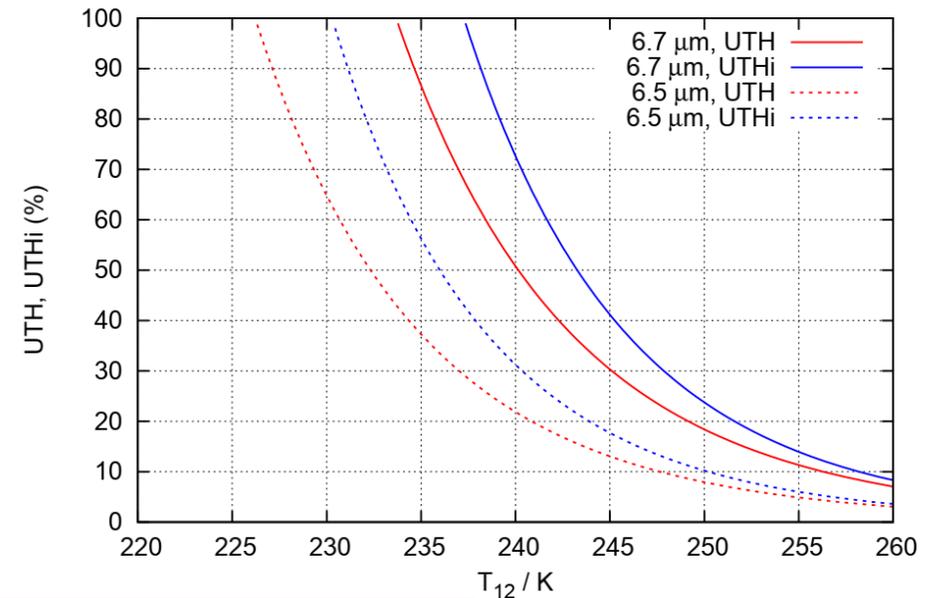
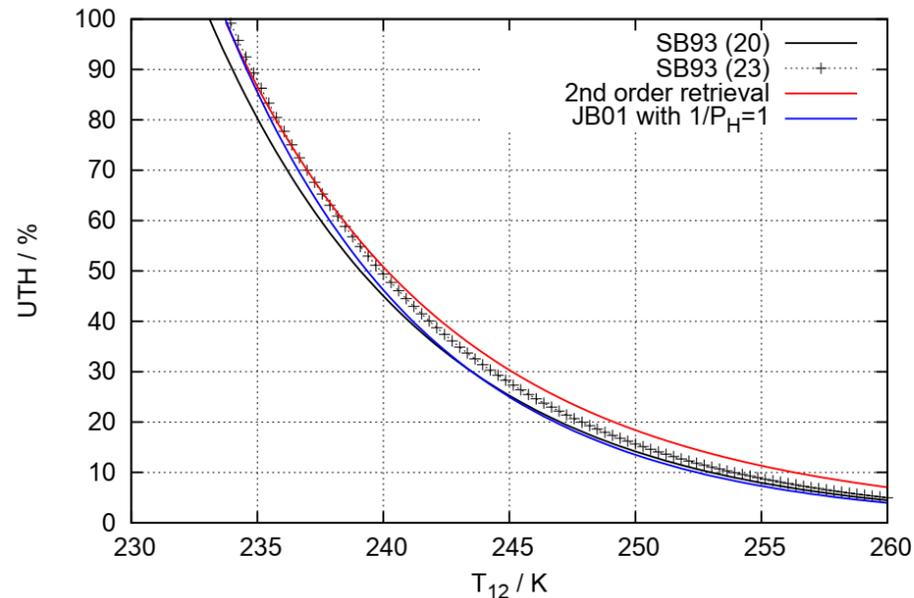
- Mittlere Emissionsniveaus (\bar{p}) für Photonen im HIRS Kanal 12 berechnet für ca. 1500 RS-profile der Station Lindenberg (Aufstiege von April 2000 bis März 2001).
- Mittlere Temperaturen der Schichten, aus denen die Photonen stammen.
- HIRS/2 auf NOAA 14 (rot), $6.7\mu\text{m}$
- HIRS/3 auf NOAA 15 (blau), $6.5\mu\text{m}$



(Gierens & Eleftheratos, 2021)

2nd-order Retrieval von UTH(i) für alle Breiten

- Einbezug von T_6 , um unterschiedliche $T(p)$ Verhältnisse in verschiedenen Breiten zu berücksichtigen.

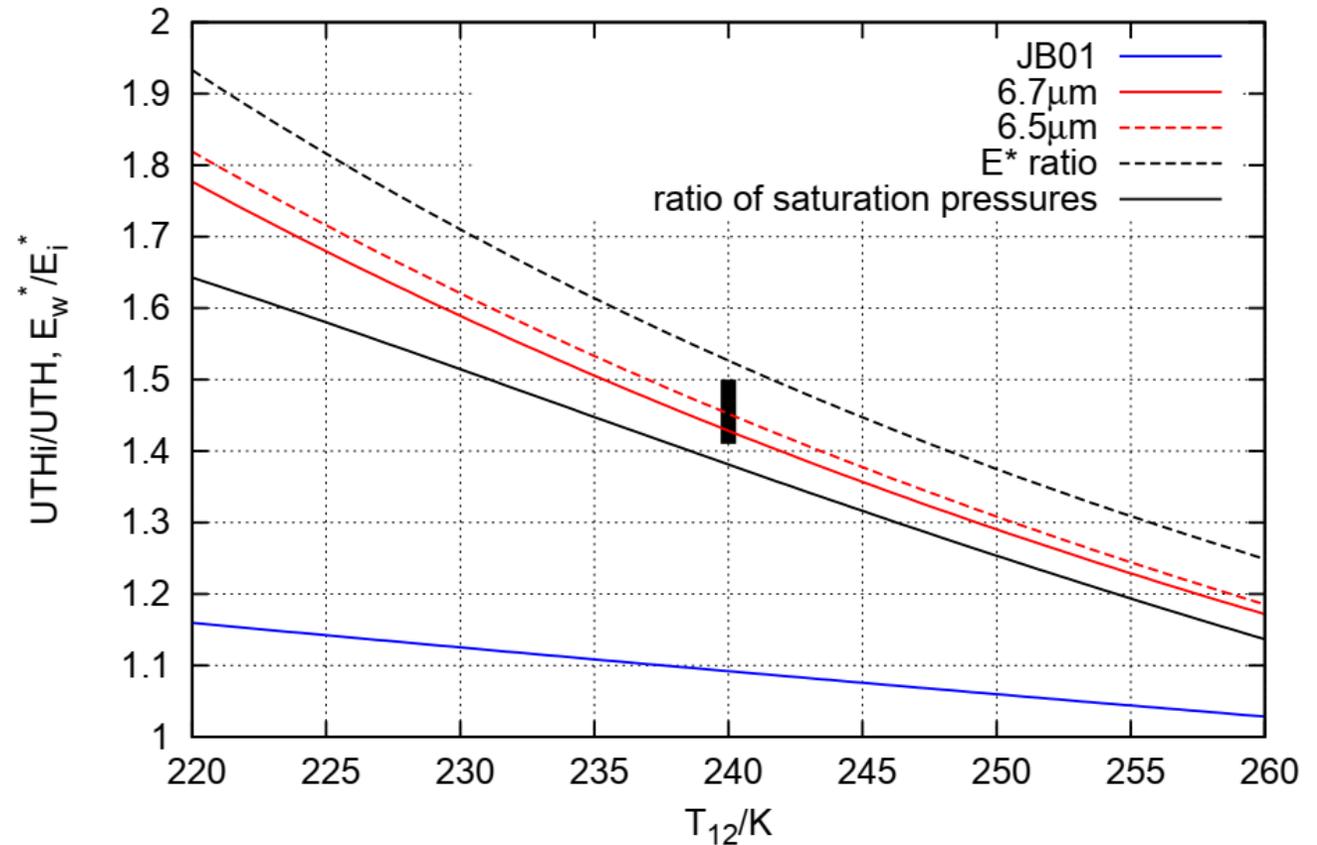


$$U/\% = 100 \frac{\exp(a + bT_{12} + cT_{12}^2)}{a' + b'T_6}$$

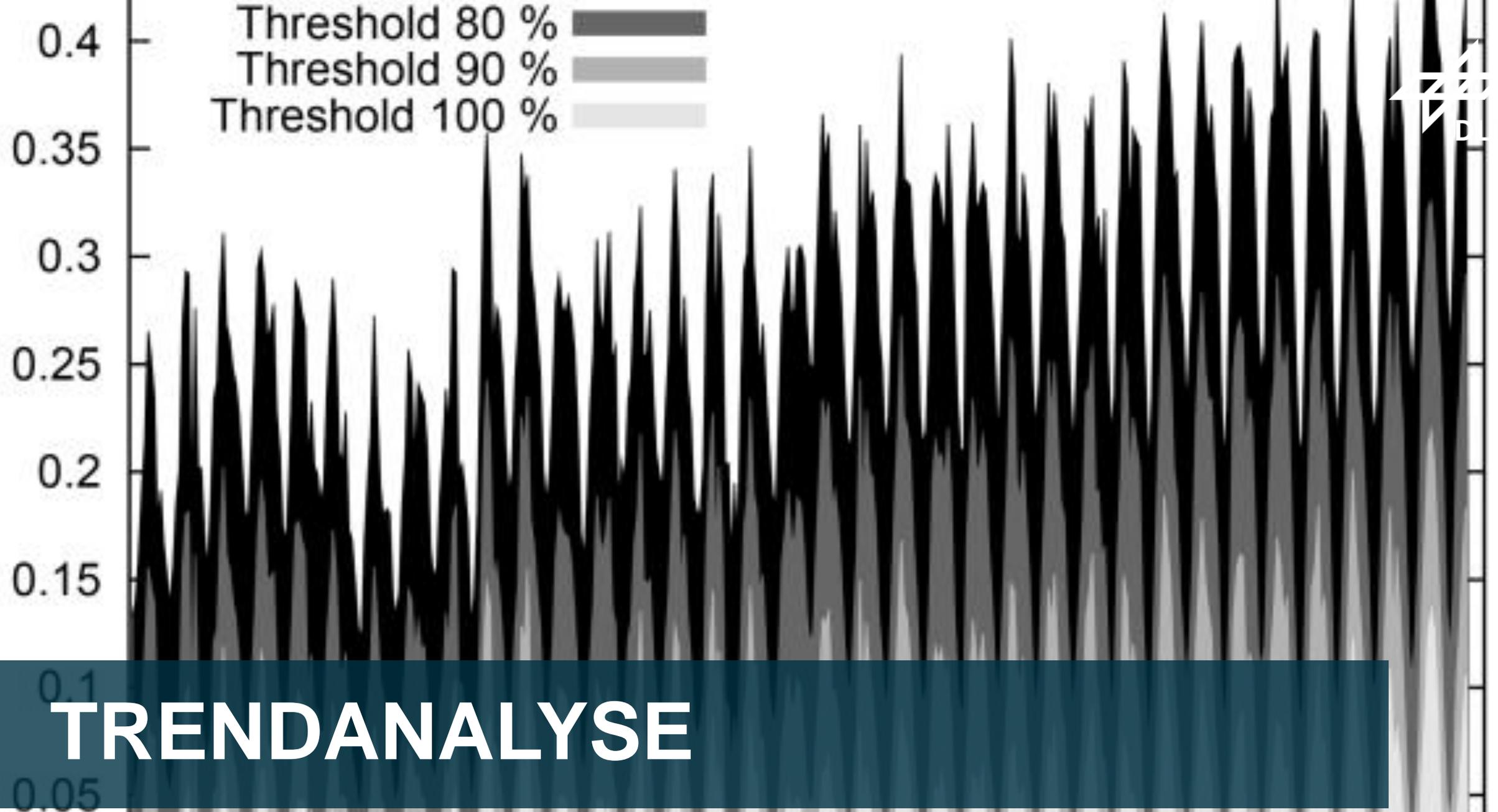
(Gierens & Eleftheratos, 2019)

UTH vs UTHi

- UTHi/UTH sollte bei einer bestimmten Temperatur ungefähr $\frac{e_w^*}{e_i^*}$ entsprechen. Das ist hier der Fall.



(Gierens & Eleftheratos, 2019)



TRENDANALYSE

Motivationen für eine Trendanalyse

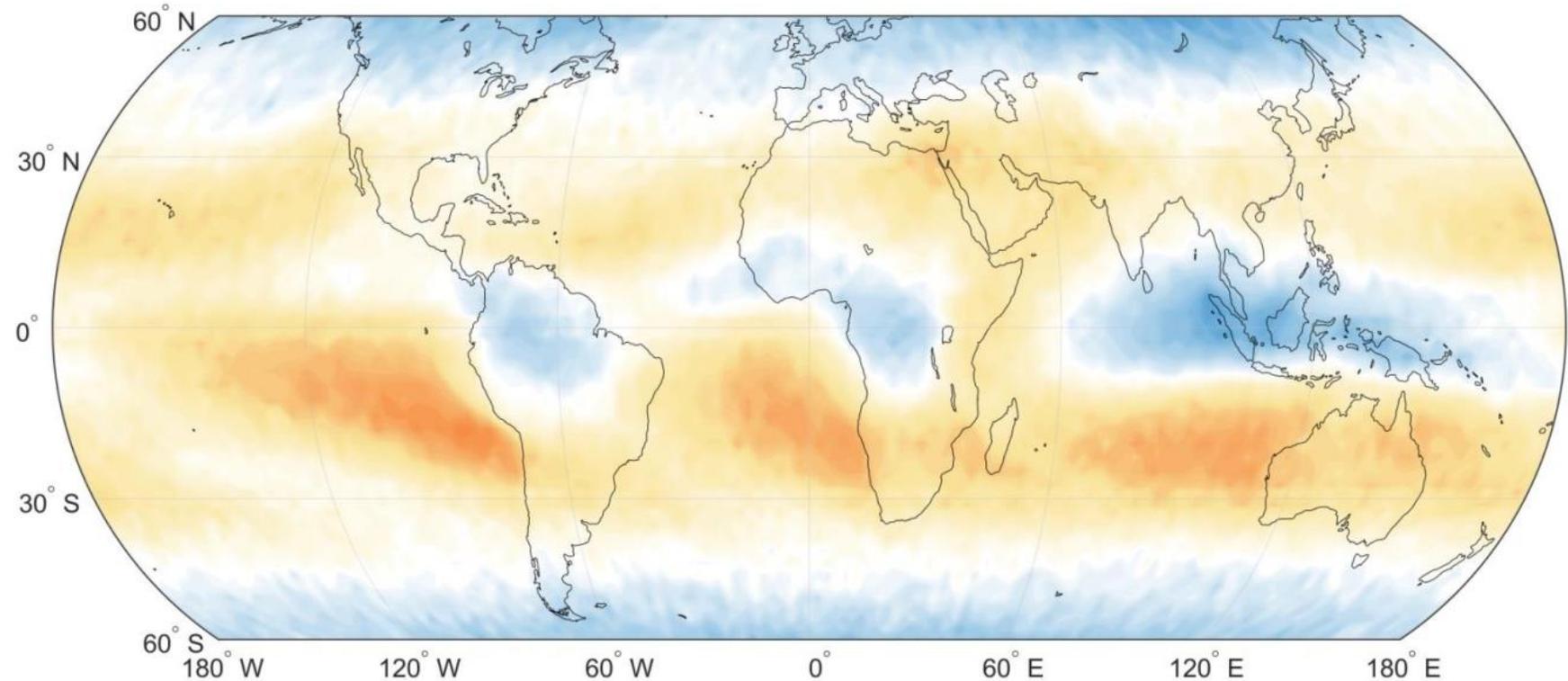


- Die Feuchte in der Atmosphäre ist in der Regel nicht im Gleichgewicht. Prozesse hin zum Gleichgewicht sind langsamer als Prozesse, die aus dem Gleichgewicht hinausführen (Argument von Sherwood).
- Damit steht auch die einfache Annahme, die Feuchte ändere sich in einem wärmeren Klima so, dass RH konstant bliebe, auf wackeligen Füßen.
- (Es könnte ja auch RH_i konstant bleiben, das ist aber ein Unterschied).
- Die Häufigkeit der Fälle starker Übersättigung, die für Zirrenbildung benötigt wird, ändert sich bei nur geringen Änderungen des Feuchtemittelwerts unverhältnismäßig stark (aufgrund der exponentiellen Verteilung von RH_i).
- Damit kann sich die Häufigkeit von Zirren und persistenten Kondensstreifen durch leichte Änderung der mittleren Feuchte erheblich ändern.

Mittelwerte von UTHi im Zeitraum 1979 bis 2020

rot: UTHi < 50%
(trocken):
Subtropische
Subsidenzzonen

blau: UTHi > 50%
(feucht): Tropische
Konvektionszonen
und Extratropen

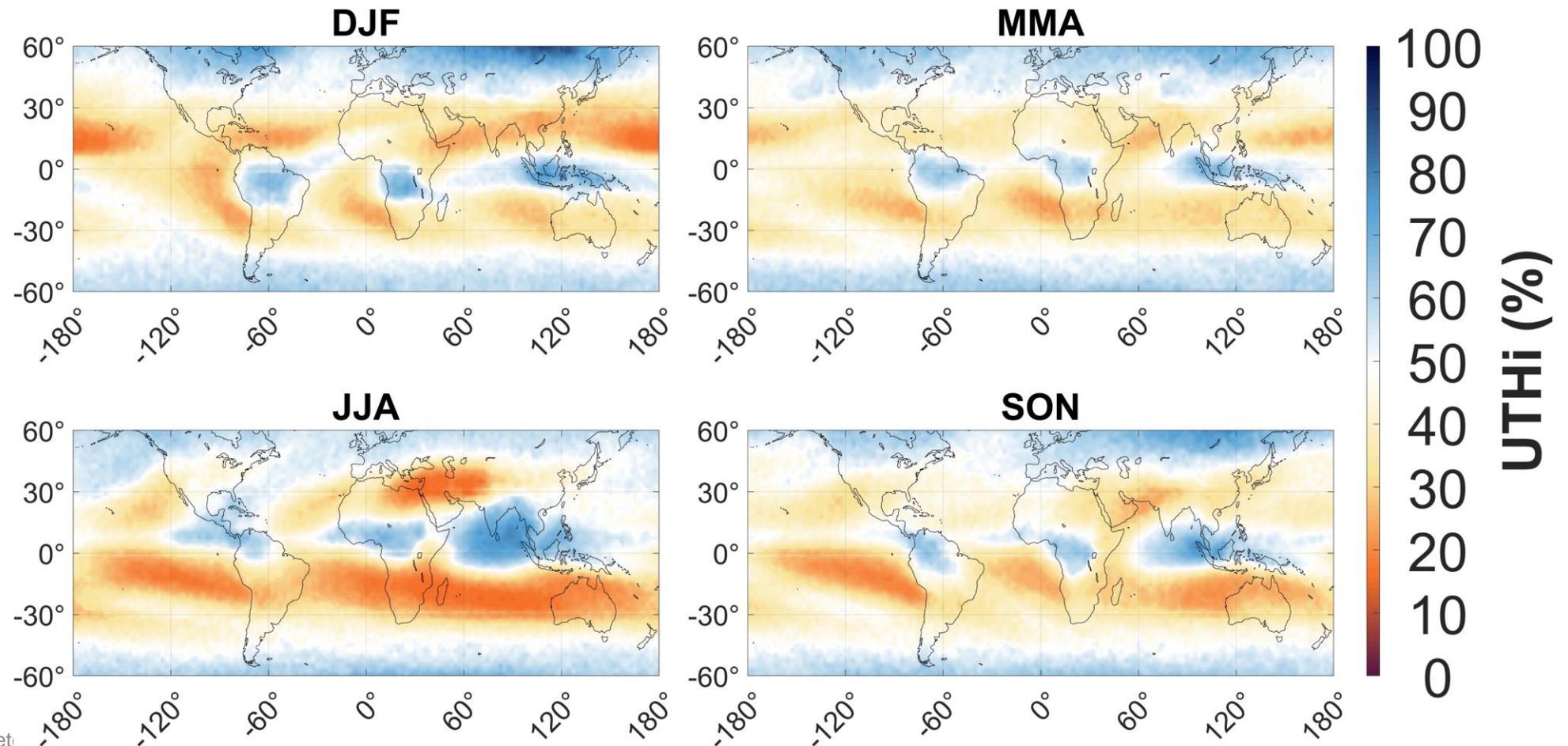


2.5° × 2.5° resolution



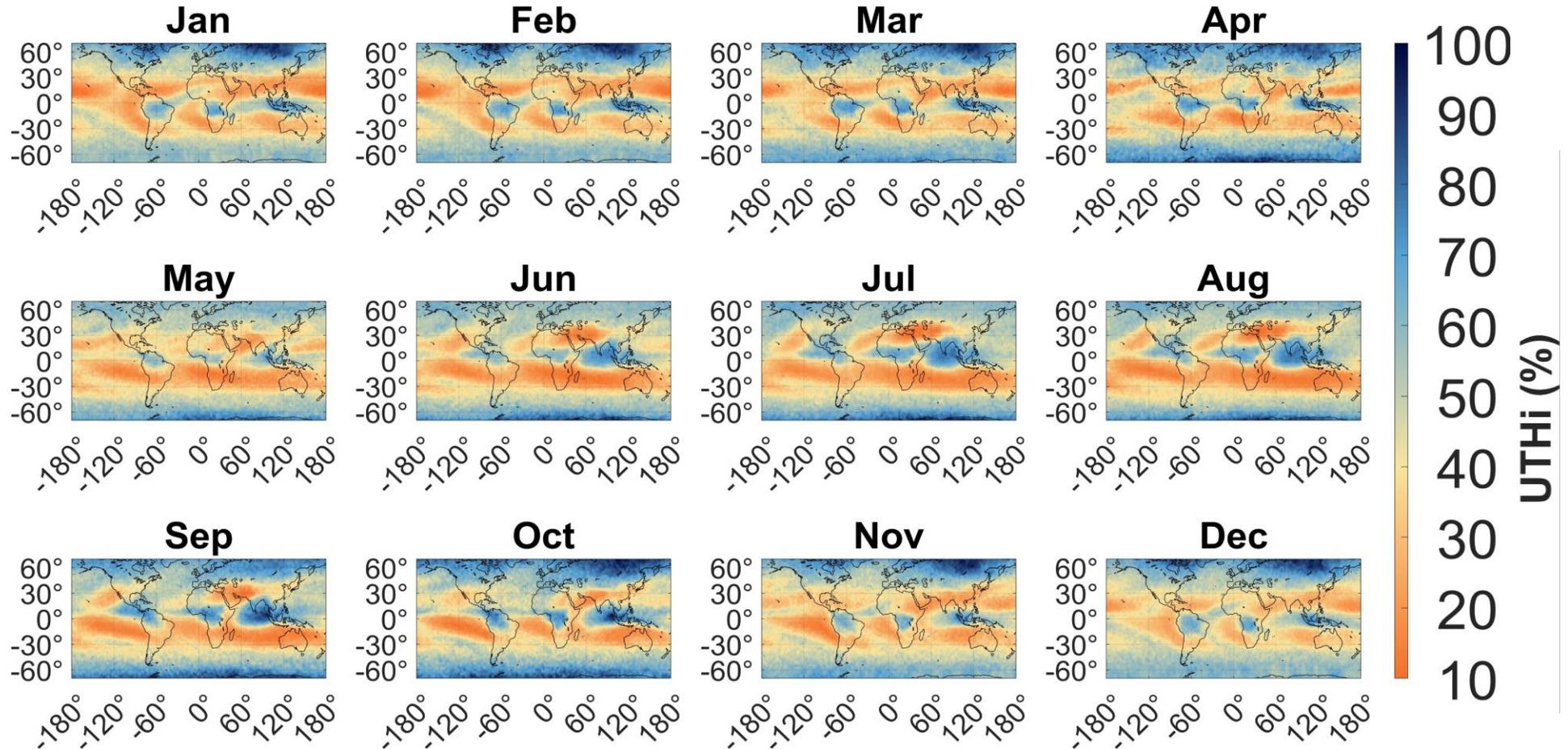
Mittelwerte von UTHi im Zeitraum 1979 bis 2020

- UTHi auf einem $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ Gitter, 60°S - 60°N (saisonale Mittel)



Mittelwerte von UTHi im Zeitraum 1979 bis 2020

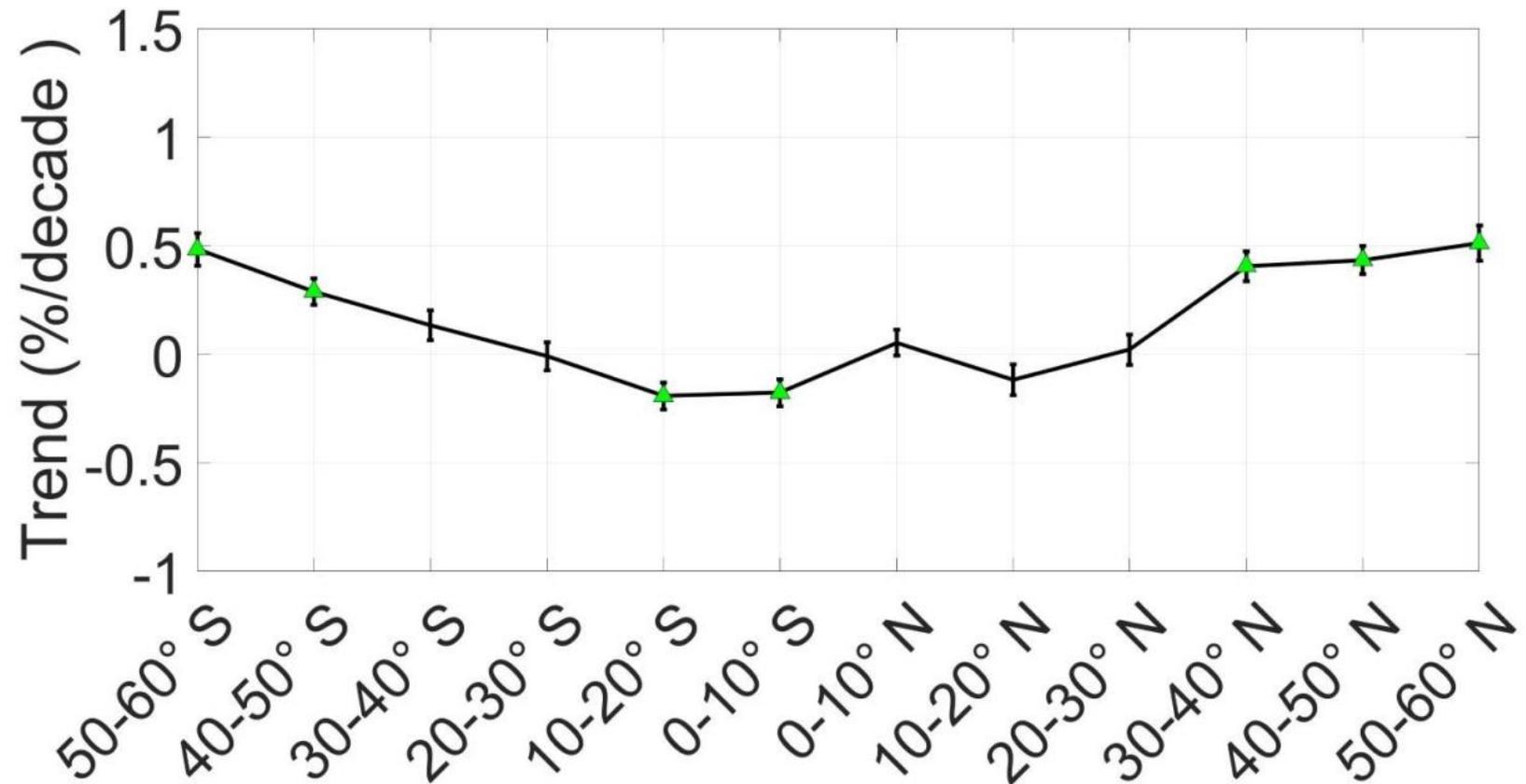
- UTHi auf einem $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ Gitter, 60°S - 60°N (monatliche Mittel)



Generelle trends von UTHi in Abh. von der geogr. Breite

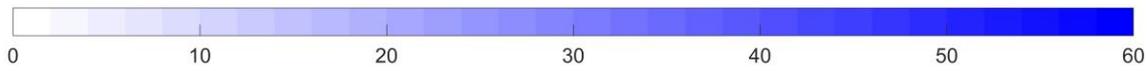
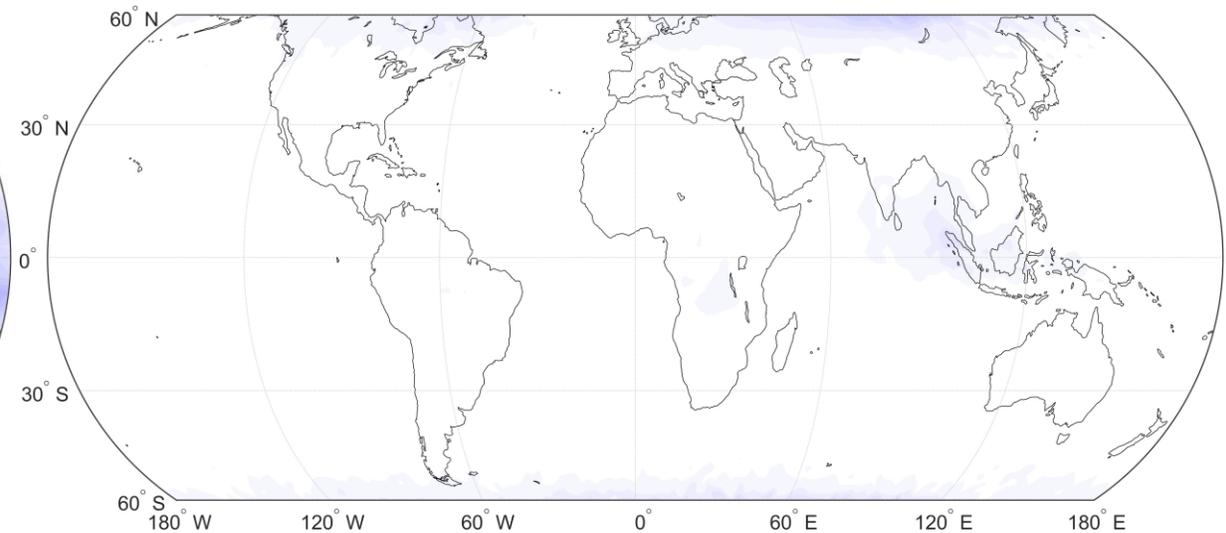
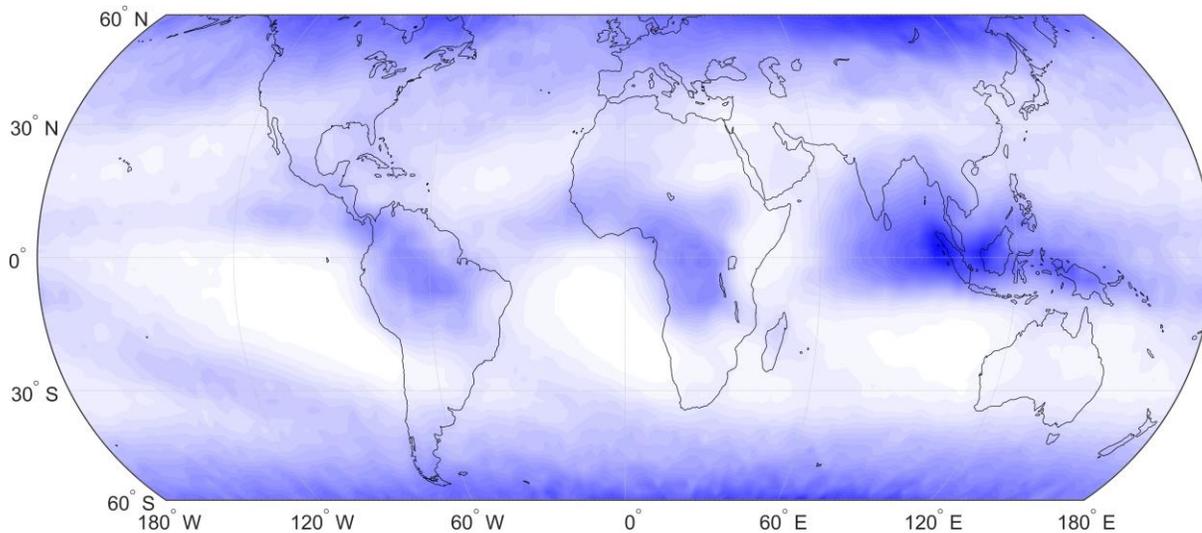


- Trendanalysen mittels Anomalien der monatlich gemittelten UTHi in Zonen von 10° Breite für den Zeitraum 1979-2020.
- Signifikanztests zum Niveau $P < 0.01$ nach Mann und Kendall).
- Statistisch signifikante Trends ($P < 0.01$) sind grün markiert.

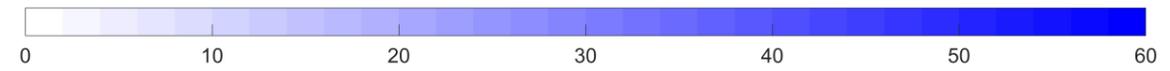


Schwellwertüberschreitungen: Klimatologie

Relativer Anteil an Daten mit UTHi über gewissen Schwellwerten, hier 70% und 100%



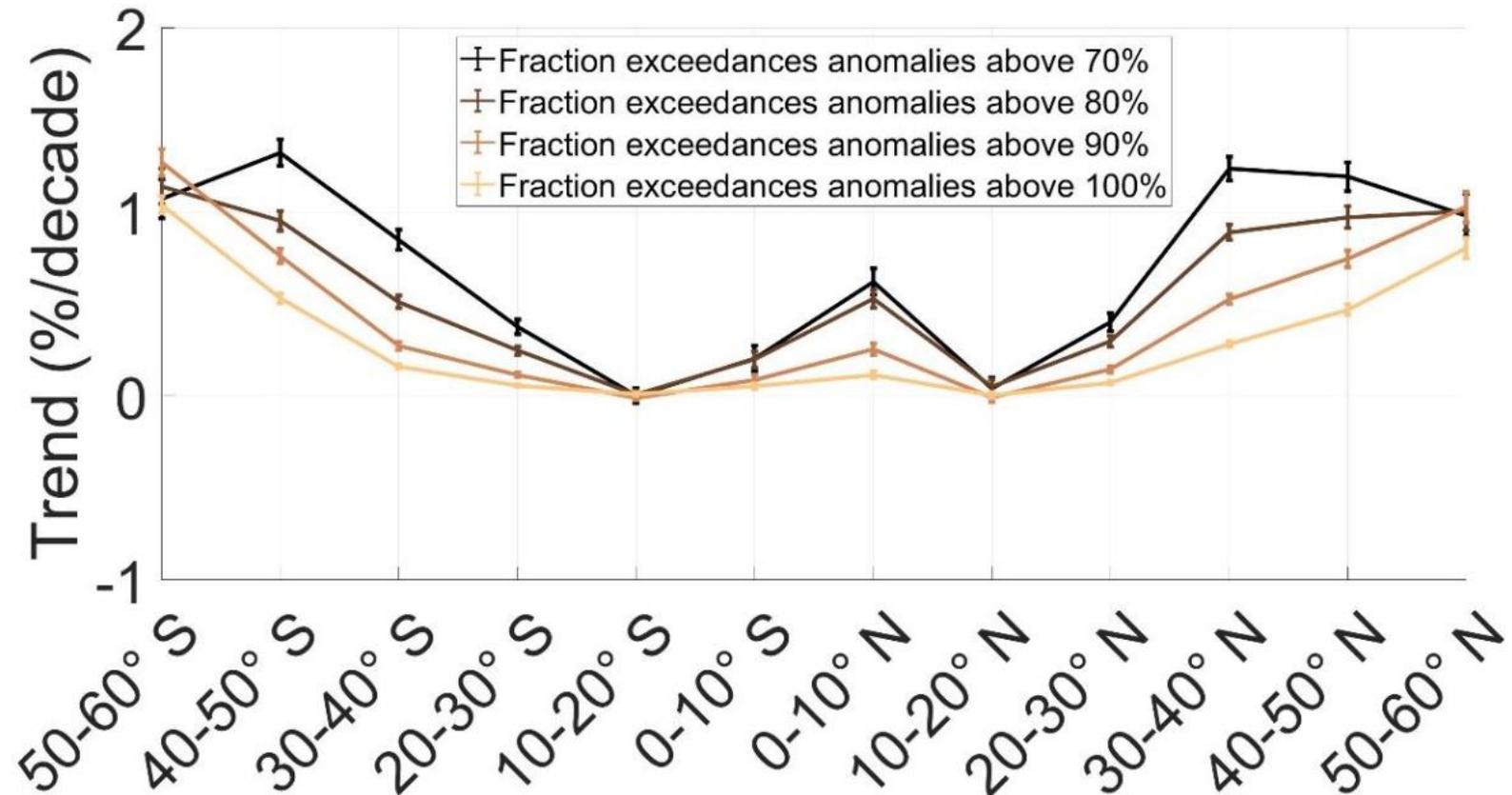
rel. frequency of UTHi>70% (%)



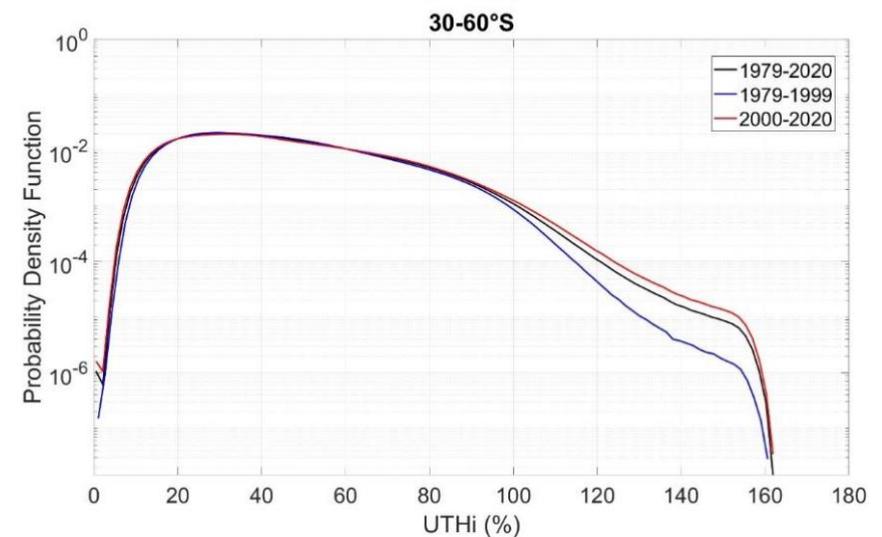
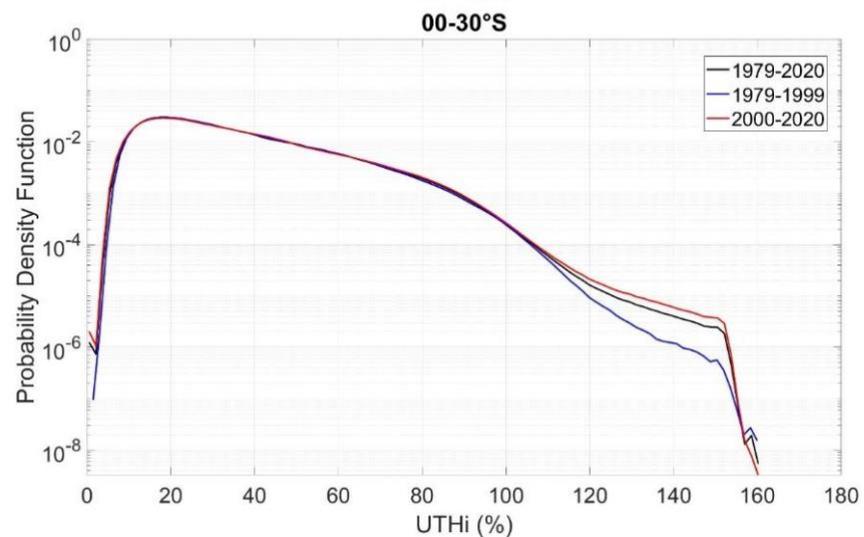
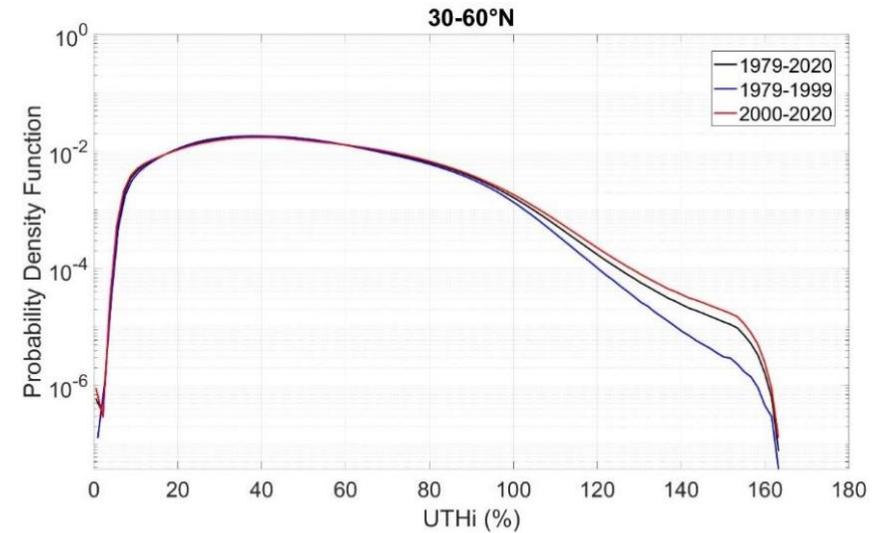
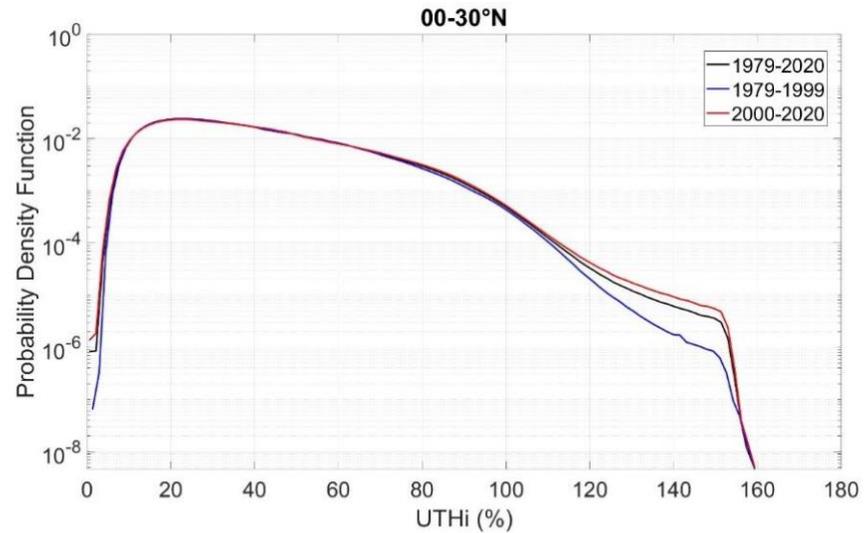
rel. frequency of UTHi>100% (%)

Schwellwertüberschreitungen: Dekadische Trends

- Trends für Schwellwertüberschreitungen von 70%, 80%, 90% und 100%.
- Definition: Anteil an Werten $UTH_i > \text{Schwellwert}$.
- Trends sind größer als die Trends von UTH_i im Mittel \Rightarrow Änderung der Form der statistischen Verteilung von UTH_i .

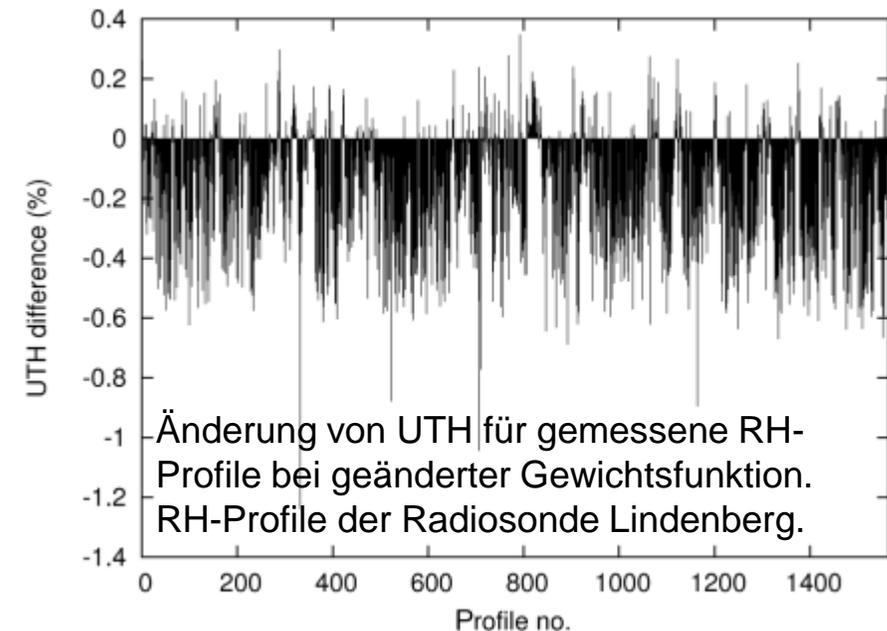
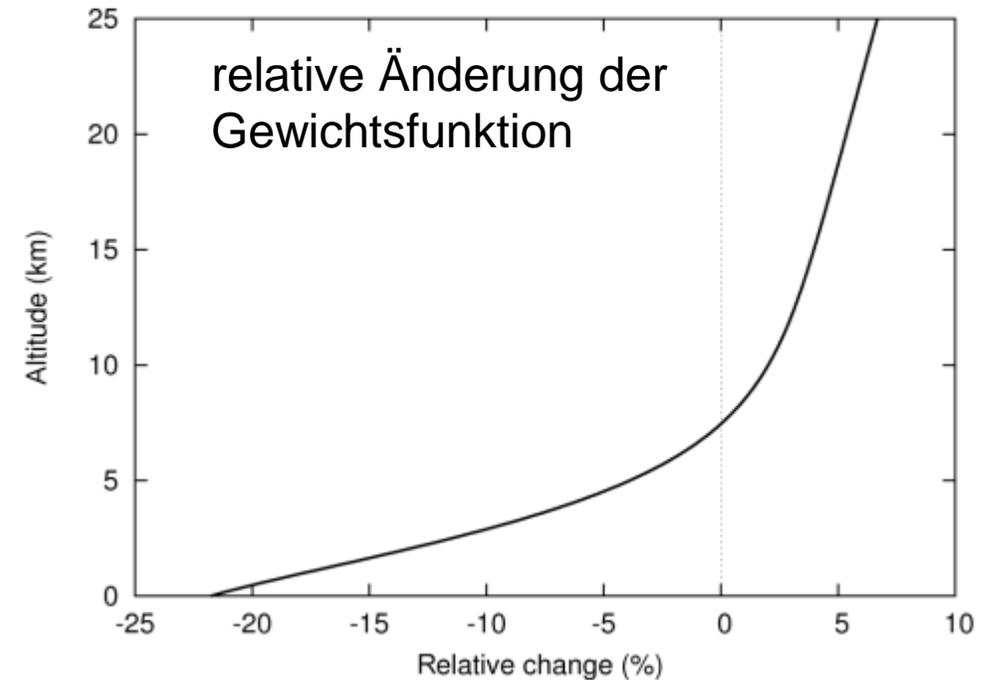


Änderung der Häufigkeitsverteilung von UTHi



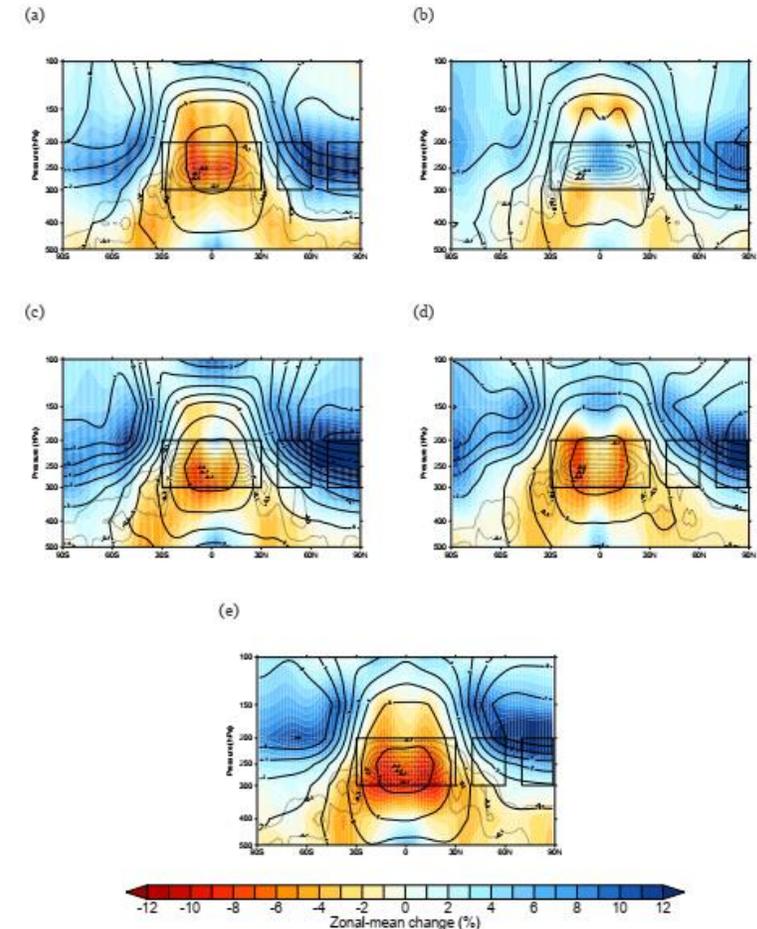
Interpretation, Implikationen

- Gierens & Eleftheratos (2016) zeigen, dass bei steigenden Temperaturen und gleichzeitiger Konstanz (im Mittel) der relativen Feuchte UTH(i) leicht abnehmen muß, da sich die Gewichtsfunktionen entsprechend verschieben.
- RH(i) nimmt also in der UT der mittleren Breiten langsam zu.



Entsprechende Modellergebnisse

- HIRS-UTH(i)-trends bestätigen, was mit Klimamodellen berechnet wurde, z.B. Irvine&Shine (2015), Sherwood et al. (2010), Wright et al. (2010):
 - RH verändert sich regional unterschiedlich;
 - In den Tropen Abnahme oder wenig Änderung;
 - In der UT der mittleren und polaren Breiten Zunahme der RH.



Irvine & Shine, ESD, 2015

The background of the slide is a photograph of a dark, stormy sky. A faint rainbow is visible in the lower half of the frame, and a single bird is seen in flight on the left side. A dark teal horizontal bar is overlaid at the bottom, containing the title text.

ZUSAMMENFASSUNG

Zusammenfassung: Eisübersättigung



- Die atmosphärische Feuchte ist selten im thermodynamischen Gleichgewicht. Daher ist in der UTLS RHi meist $<100\%$, aber gelegentlich $>100\%$ → Eisübersättigung, ISSR
- (Starke) Eisübersättigung ist Voraussetzung für die Bildung von Zirren *in-situ* und die Persistenz (und Klimawirkung) von Kondensstreifen.
- ISSRs sind an die Dynamik der Atmosphäre gekoppelt; i.d.R. entsteht Eisübersättigung durch Aufgleiten und adiabatische Abkühlung von Luftmassen.
- ISSRs befinden sich am häufigsten direkt unterhalb der Tropopause in Gebieten mit divergenten und antizyklonalen Luftbewegungen.
- ISSRs sind i.d.R. wenige 100m dick, aber oft übereinander gestapelt.
- Die Übersättigung in ISSRs ist exponentiell verteilt.

Zusammenfassung: Satellitenperspektive



- Die lokale Größe $RH(i)$ kann von Satelliten nicht gemessen werden; stattdessen wird eine Art mittlere Feuchte in einer dicken Schicht der UT bestimmt: $UTH(i)$.
- Die Dicke und Höhe sowie sonstige Eigenschaften der emittierenden Schicht hängt vom Feuchtegehalt selbst ab → Beitragsfunktion und deren Momente.
- Mit dem 2nd-order retrieval und einigen Korrekturen an den Zeitreihen von T_6 und T_{12} kann eine 40-jährige homogene Zeitreihe hergestellt werden, die Trendanalysen erlaubt sowie die Darstellung langjähriger Mittel (Klimatologien) auf Jahresbasis, saisonaler und Monatsbasis.
- Klimatologie und Trends von Schwellwertüberschreitungen zeigen, wo die UT am feuchtesten ist.

Zusammenfassung: dekadische Trends von UTHi



- UTHi zeigt in den Tropen schwache Trends (nicht immer signifikant), in den Extratropen beider Hemisphären stärkere (signifikante) Trends bis ca. 1%/Dekade.
- Im globalen Mittel steigt UTHi um $\sim 0.15\%$ /Dekade, d.h. um 0.6% zw. 1980 und 2020.
- Weitgehend konsistent mit Ergebnissen von Klimasimulationen.
- UTHi Trends sind bei hohen Werten ($UTHi > 70\%$) stärker als im Mittelwert. Die Verteilungsfunktion der UTHi verschiebt sich zu höheren Werten hin.
- Das könnte bedeuten, dass sich die Bedingungen für die Bildung von Zirren und persistenten Kondensstreifen im Lauf der Zeit leicht verbessert haben.
- Würde RH im Klimawandel konstant bleiben, müßte UTHi kleiner werden.