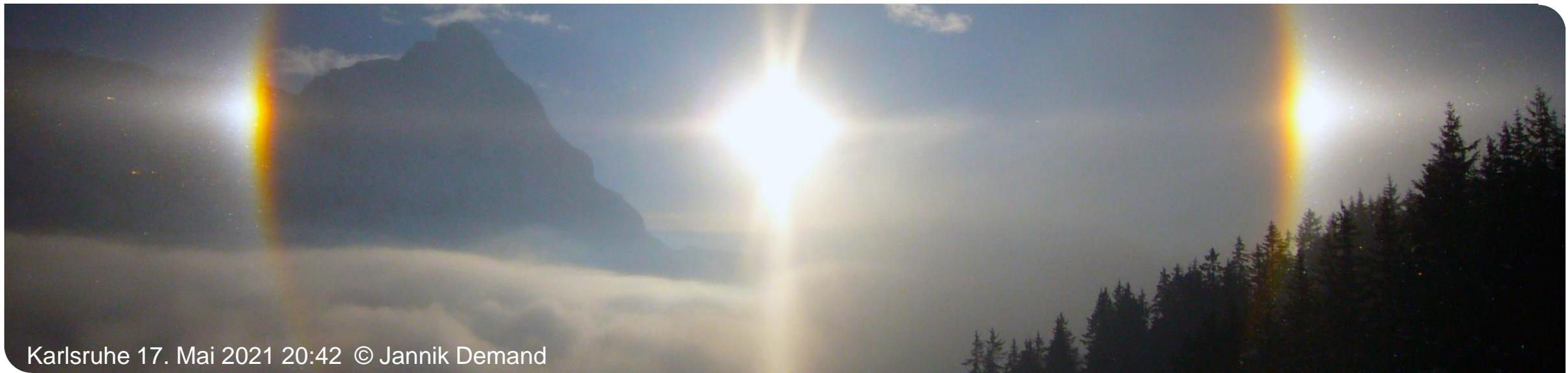


Vorlesung „Allgemeine Meteorologie“

Prof. Michael Kunz

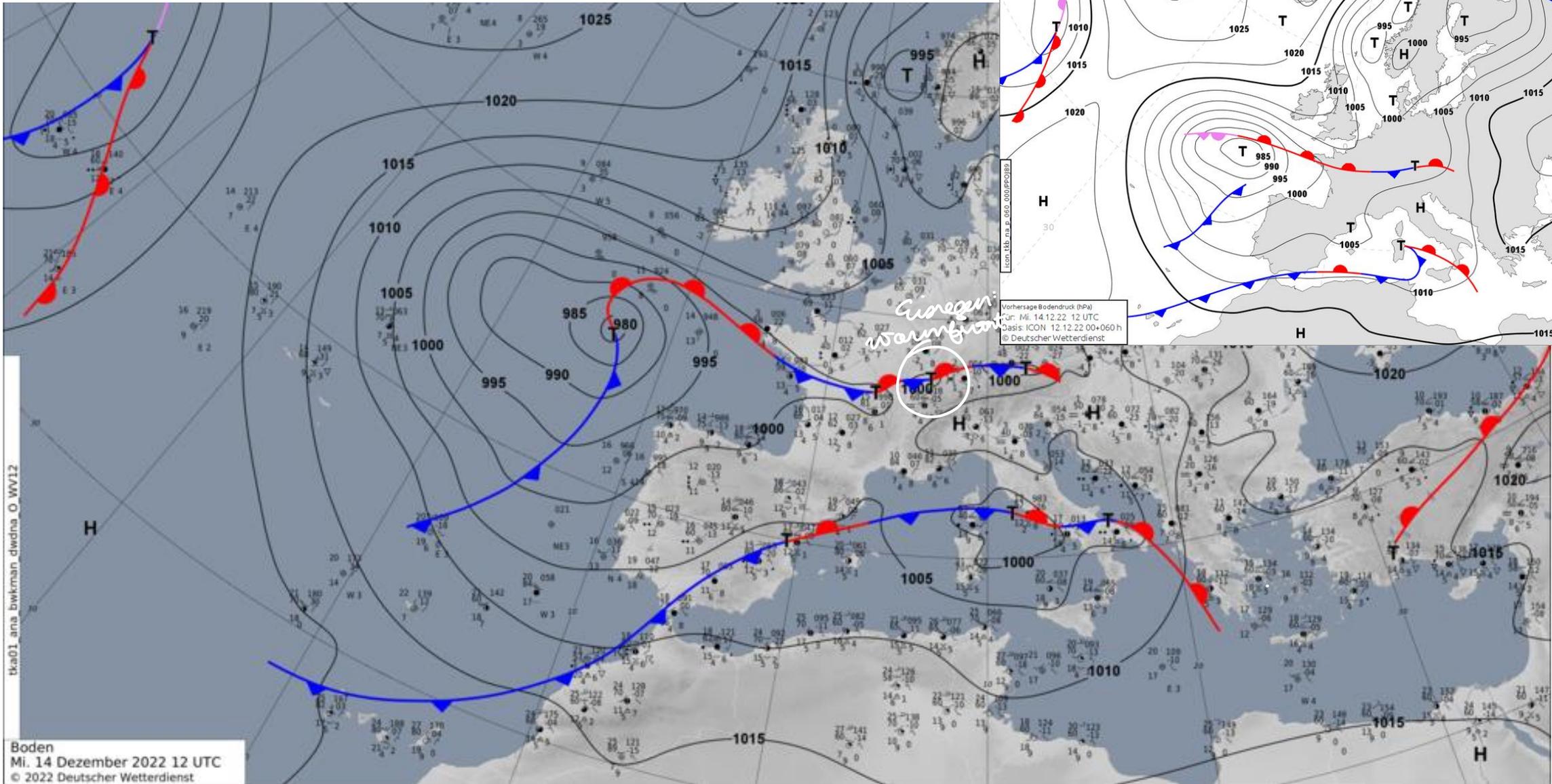


Das Wetter...



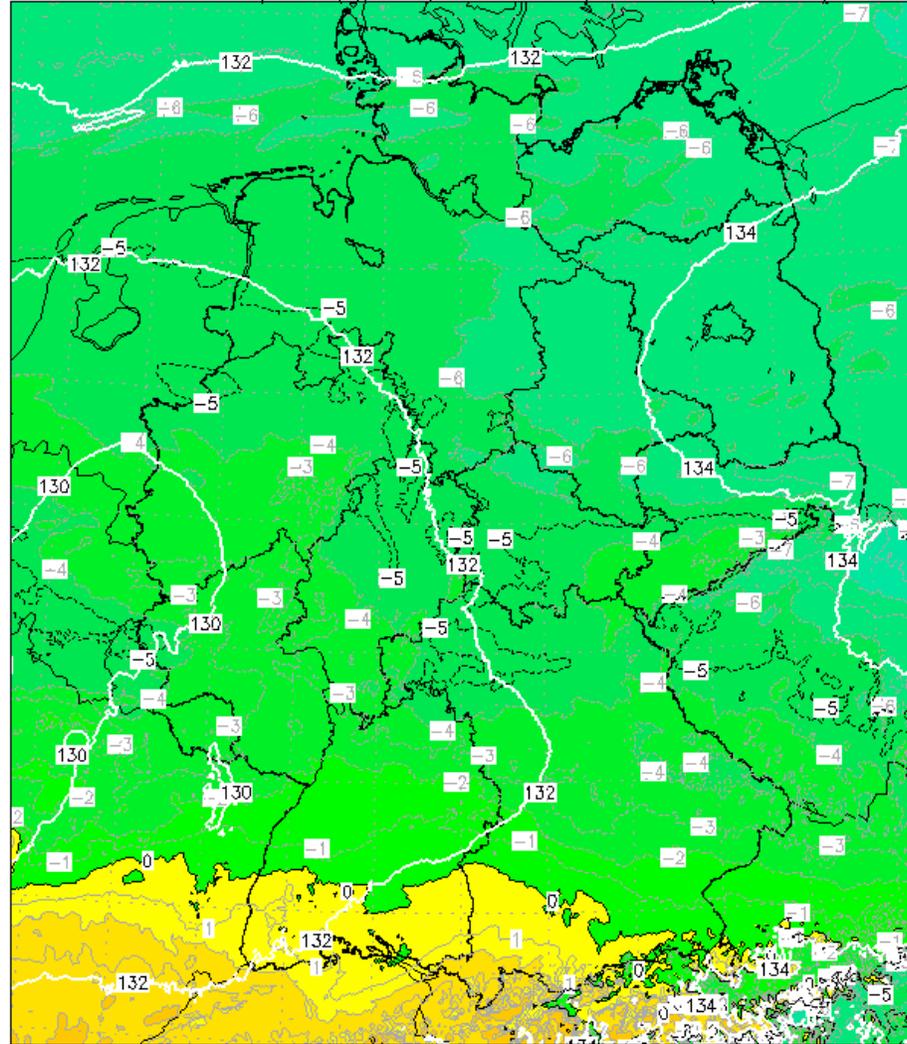
Karlsruhe 17. Mai 2021 20:42 © Jannik Demand

Bodenwetterkarte 14.12. 06:00

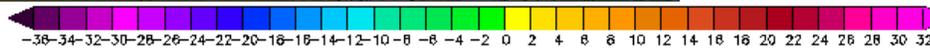


Temperatur 850 hPa

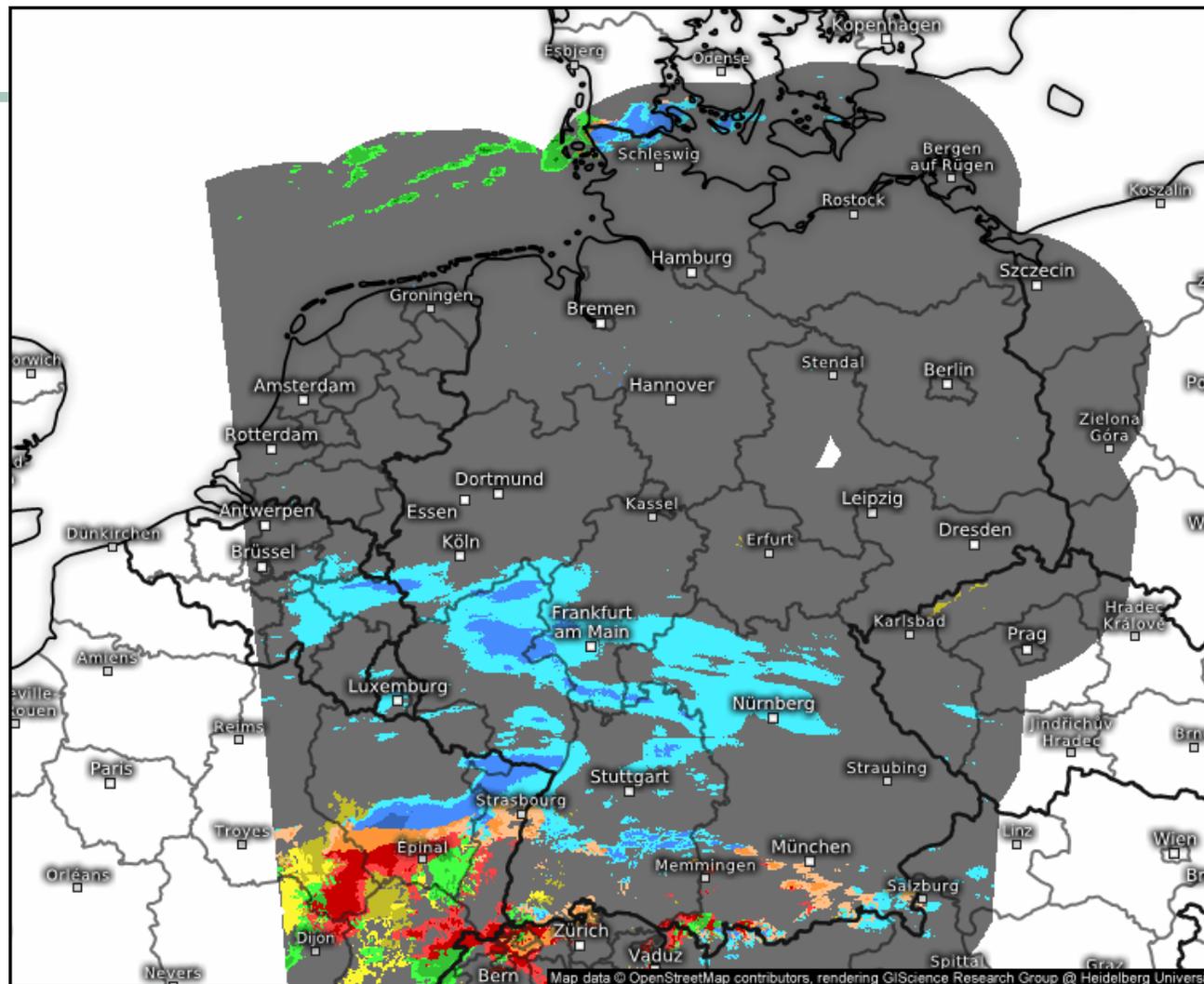
Init: Wed,14DEC2022 06Z 850 hPa Geopot. (gpdm) und Temperatur (Grad C) Valid: Wed,14DEC2022 06Z



Data: ICON D2 0.020°
WWW.WETTERZENTRALE.DE



Radar: Hydrometeorart



Wetteranalyse LiveHD

Mi. 14.12.2022, 08:25 Uhr MEZ

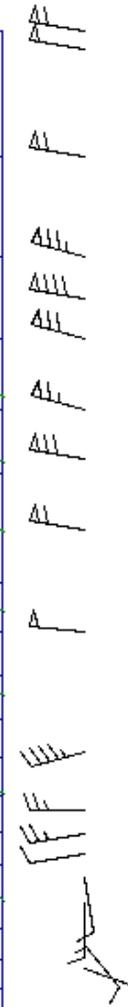
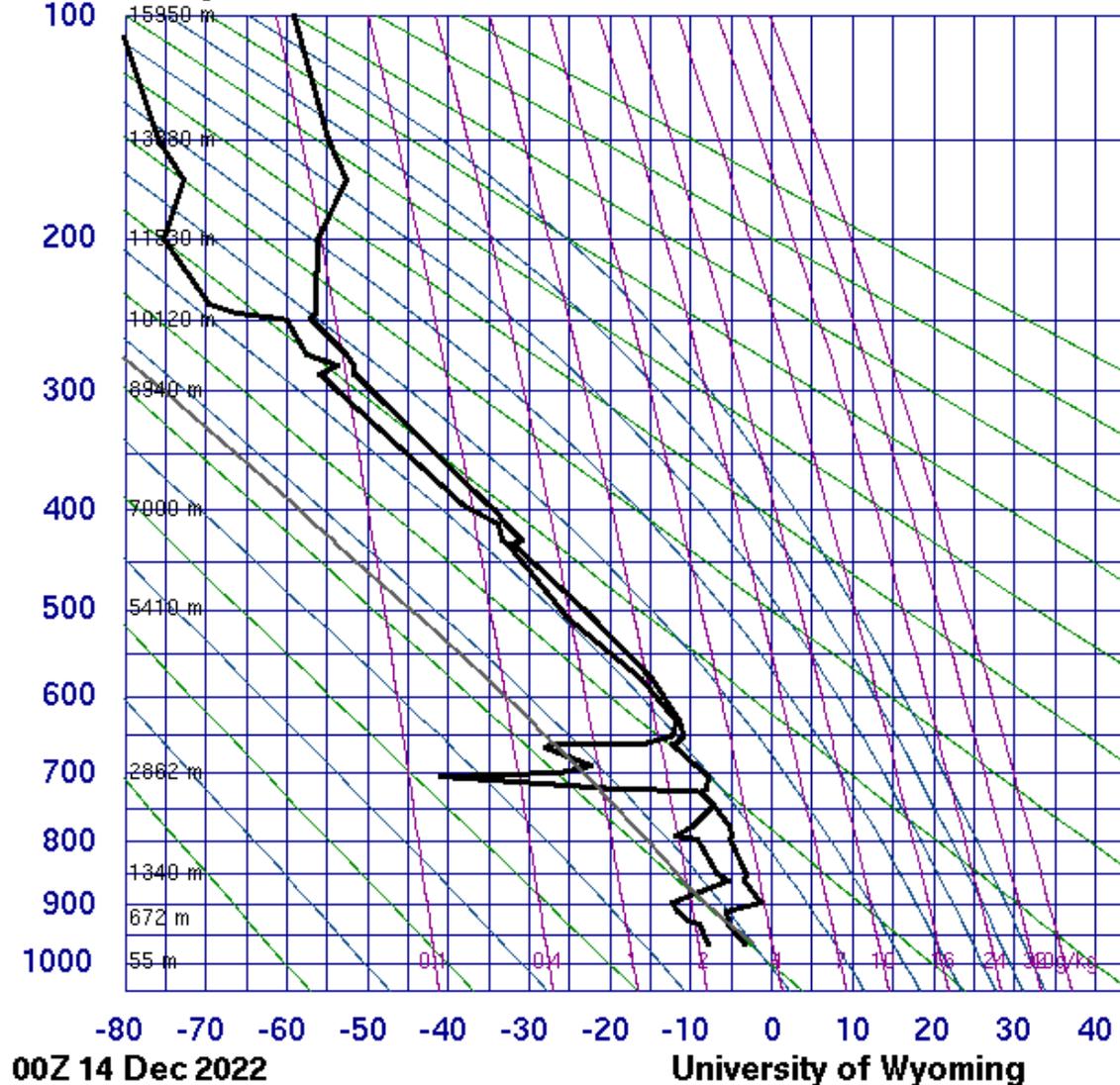
Nebel	Nebel Reifbildung	Regen leicht	Regen mäßig	Regen stark	Gewitter In der Nähe	Gewitter leicht/mäßig	Gewitter stark
Schneeregen leicht	Schneeregen mäßig/stark	Schneefall leicht	Schneefall mäßig	Schneefall stark	gefr. Regen leicht	gefr. Regen mäßig/stark	

Deutschland

 kachelmannwetter.com
WETTER HD

Sounding Stuttgart

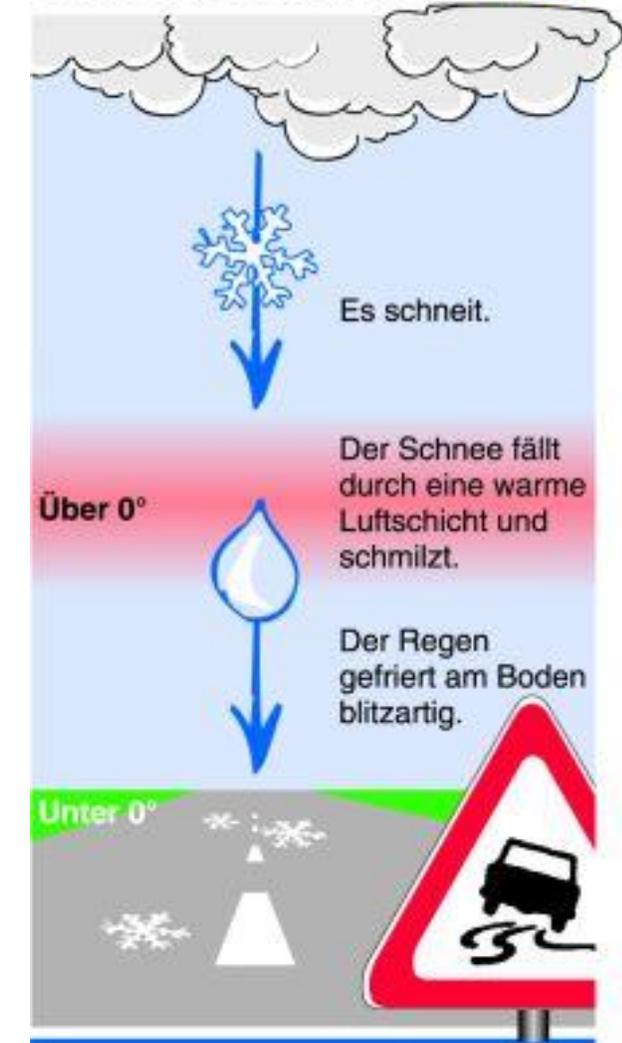
10739 Stuttgart



SLAT	48.83
SLON	9.20
SELV	321.0
SHOW	12.47
LIFT	21.46
LFTV	21.58
SWET	71.87
KINX	-4.70
CTOT	16.40
VTOT	20.00
TOTL	36.40
CAPE	0.00
CAPV	0.00
CINS	0.00
CINV	0.00
EQLV	-9999
EQTV	-9999
LFCT	-9999
LFCV	-9999
BRCH	0.00
BRCV	0.00
LCLT	262.8
LCLP	871.7
LCLE	279.1
MLTH	273.4
MLMR	2.03
THCK	5355.
PWAT	10.18

Wie entsteht Glatteis?

Deutscher Wetterdienst





Berliner Kurier

+ Folgen

Profil anzeigen

Glättechaos, Schnee- und Eiswalze: Wetter dreht durch! Jetzt schon minus 25 Grad! Weihnachtswetter packt die ganz große Kältekeule aus

Artikel von bk/dr • Vor 49 Min.



5



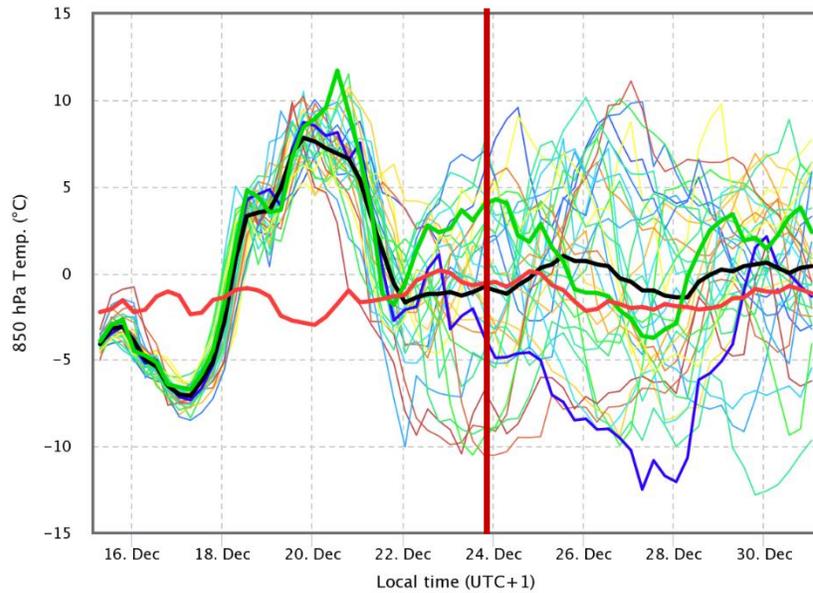
Kommentare

Vorhersage: Ensembles

- Modell GFS (Global Forecast System) des amerik. Wetterdienstes NOAA
- 30 Ensemble Läufe
- Gitterpunkt Karlsruhe



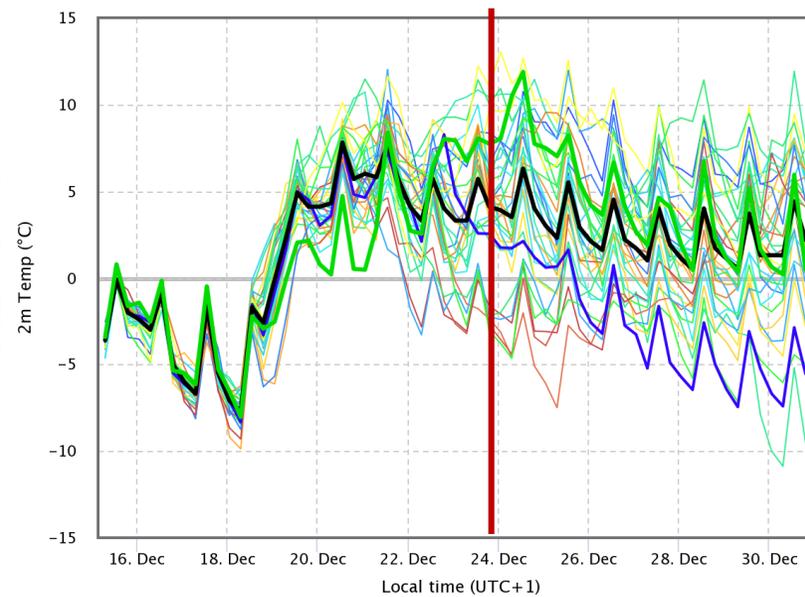
T850



P01 P02 P03 P04 P05 P06 P07 P08
 P09 P10 P11 P12 P13 P14 P15 P16
 P17 P18 P19 P20 P21 P22 P23 P24
 P25 P26 P27 P28 P29 P30 CONTROL AVG
 OPER LT MEAN 1981-2010

wetterzentrale.de

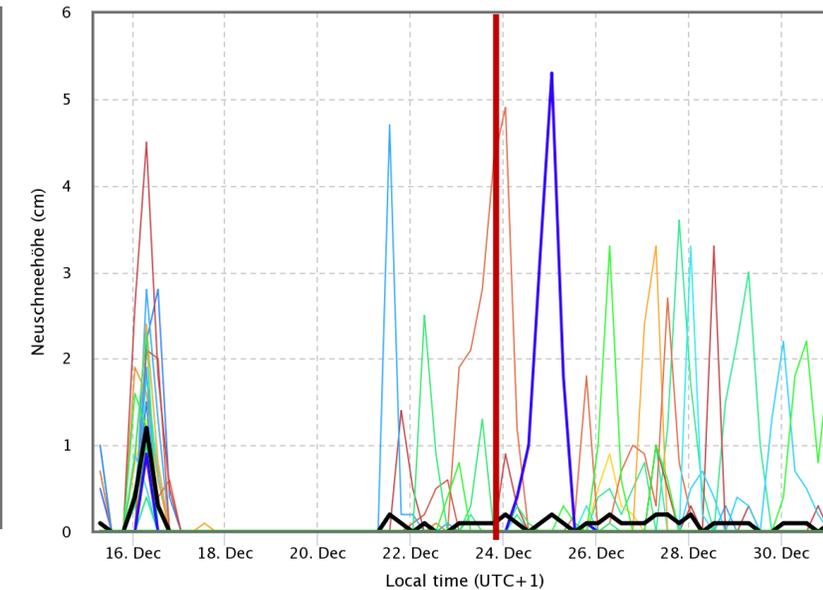
T 2m



P01 P02 P03 P04 P05 P06 P07 P08
 P09 P10 P11 P12 P13 P14 P15 P16
 P17 P18 P19 P20 P21 P22 P23 P24
 P25 P26 P27 P28 P29 P30 CONTROL AVG
 OPER

wetterzentrale.de

Neuschneehöhe



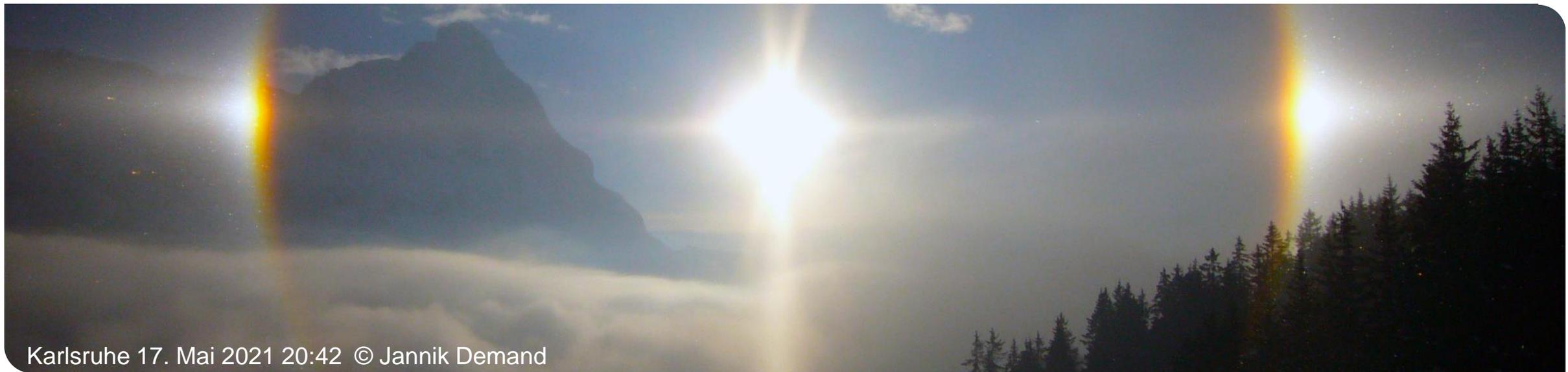
P01 P02 P03 P04 P05 P06 P07 P08
 P09 P10 P11 P12 P13 P14 P15 P16
 P17 P18 P19 P20 P21 P22 P23 P24
 P25 P26 P27 P28 P29 P30 CONTROL AVG
 OPER

wetterzentrale.de

Vorlesung „Allgemeine Meteorologie“

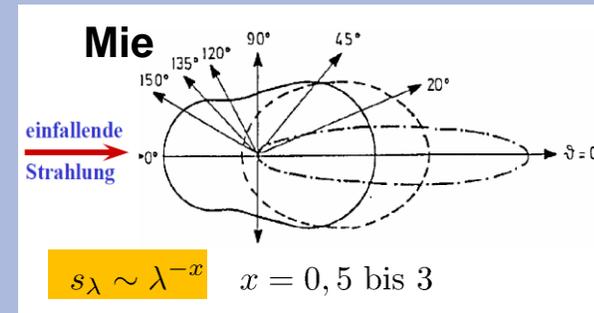
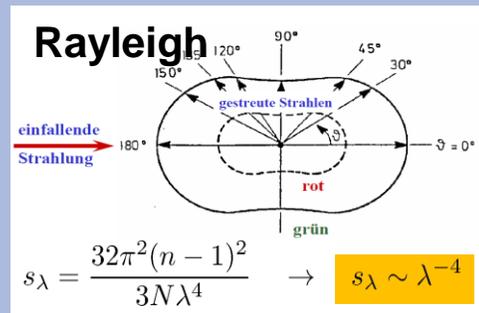
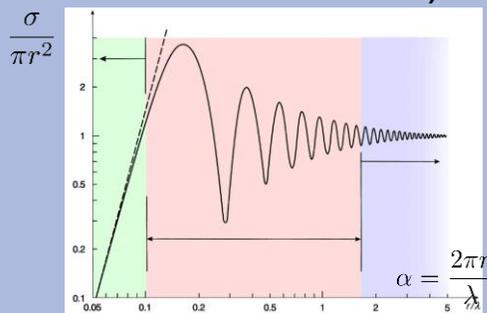
Prof. Michael Kunz

Kapitel 6: Strahlung



Wir fassen zusammen...

- **Streuung:** Umverteilung Strahlungsenergie in andere Raumrichtungen; Wellenlänge bleibt konstant; keine Absorption; abhängig von Wellenlänge/Radius Streukörper
- **Rayleigh** (Teilchen klein relativ zu ~~Streukörper~~ λ ; stärkere Streuung kürzerer Wellenlängen) vs. **Mie-Streuung** (Teilchen größer rel. zu Streuer)



- Extinktionsgesetz nach **Beer/Bouguer-Lambert:** Abnahme Strahldichte durch Absorption + Streuung;
$$I_\lambda(u) = I_\lambda(0)e^{-k_\lambda u}$$
- **Absorption** durch Schwingungs-Rotations-banden und Elektronen-Übergänge
- **Globalstrahlung:** direkte Sonnenstrahlung + diffuse Himmelsstrahlung
$$G = S + D = I \sin \varphi + D$$
- **Terrestrische Strahlung (IR): Reflexionsvermögen** und Emissionsvermögen abh. von Material/Wellenlänge
 - Z.B. Pflanzen abrupter Anstieg bei $\lambda > 0,7 \mu\text{m}$; Schnee hohes Absorptionsvermögen im IR (~schwarzer Körper)
- Absorption IR Strahlung v.a. durch H_2O , CO_2 , O_3 (+ N_2O , CH_4); geringe Absorption **8-13 μm : atm. Fenster**
- **Atmosphärische Gegenstrahlung AG:** Richtung Erdboden emittierte Strahlung;
- **Effektive Ausstrahlung:**
$$E_{eff} = \varepsilon\sigma T_B^4 - AG$$

6 Strahlung

6.1 Einführung und Definitionen

6.2 Schwarzkörperstrahlung und Strahlungsgesetze

6.2.1 Plancksches Strahlungsgesetz

6.2.2 Stefan-Boltzmann-Gesetz

6.2.3 Wiensches Verschiebungsgesetz

6.2.4 Graue Körper – Kirchhoffs Gesetz

6.3 Solare Strahlung

6.3.1 Solarkonstante

6.3.2 Albedo

6.3.3 Einfache Strahlungsmodelle

6.3.4 Streuung

6.3.5 Absorption

6.3.6 Extinktionsgesetz nach Beer / Bouguer-Lambert

6.3.7 Globalstrahlung

6.4 Terrestrische Strahlung

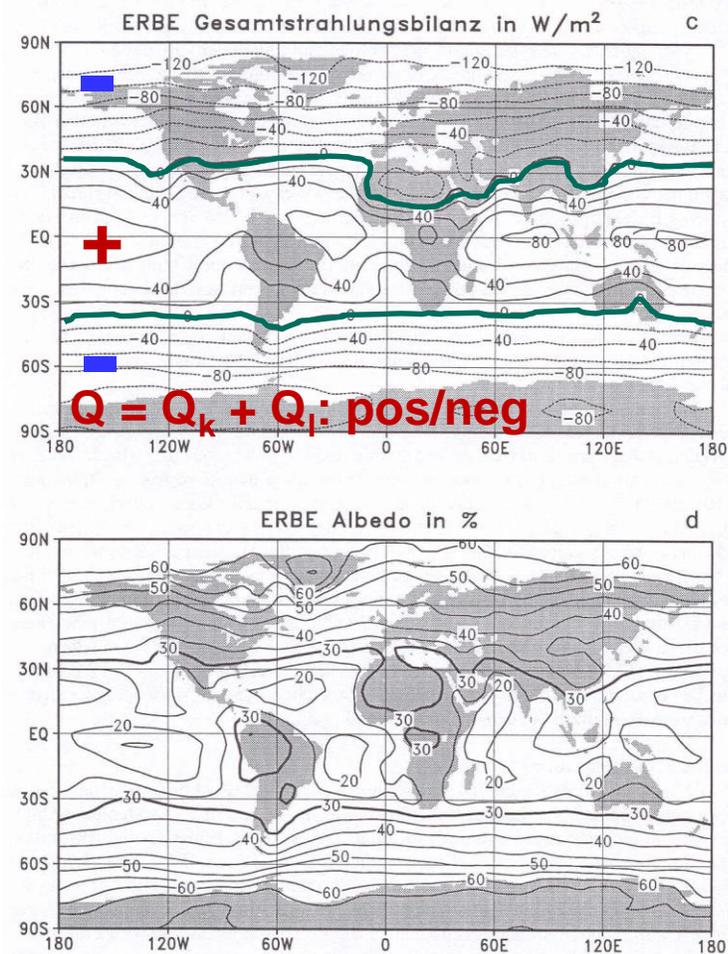
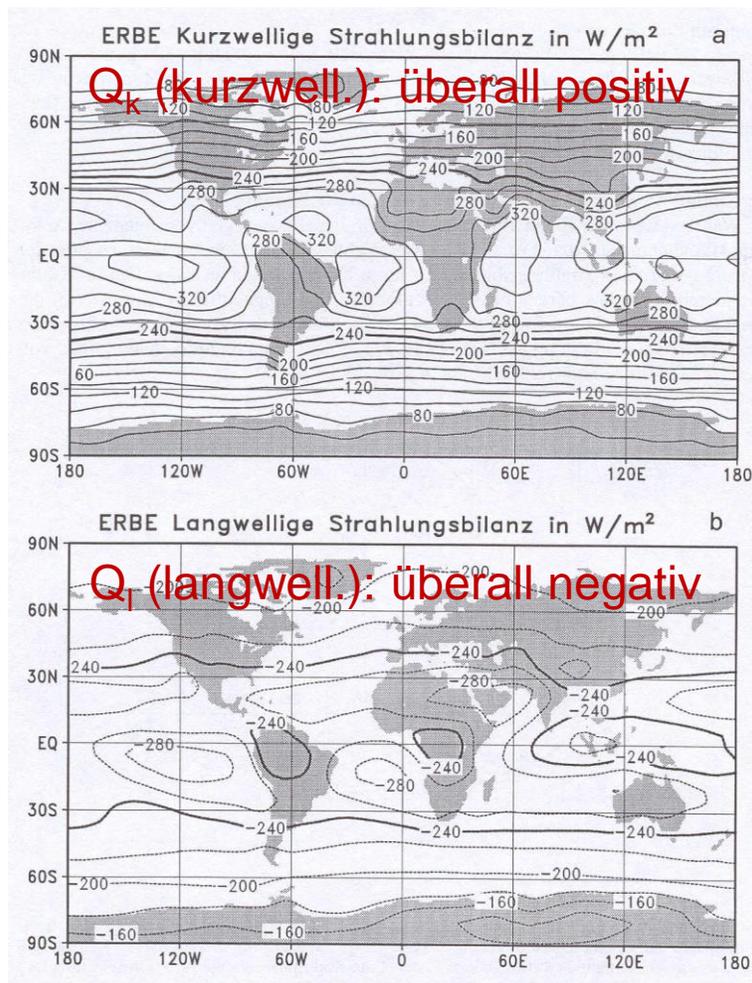
6.5 Strahlungs- und Energiebilanz

6.6 Geometrische Strahlungsgesetze und optische Phänomene

6.5 Strahlungs- und Energiebilanz

Globale mittlere Strahlungsbilanz

Strahlungsbilanz = Einstrahlung – Ausstrahlung; kurzwellig / langwellig

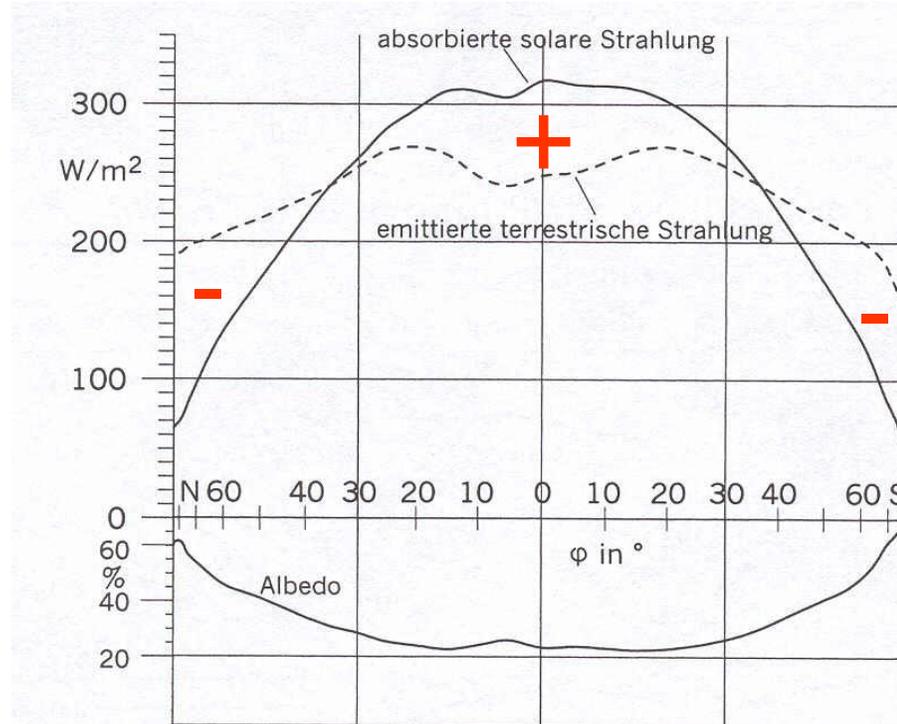


(Quelle: Kraus, 2004)

6.5 Strahlungs- und Energiebilanz

Globales Breitenmittel Strahlungsbilanz

- Niedrige Breiten: positive Strahlungsbilanz (Einstrahlung > Ausstrahlung)
- Mittlere / hohe Breiten: negative Strahlungsbilanz: (Ausstrahlung > Einstrahlung)
- Resultierende differentielle Erwärmung: Ursache von Bewegung in Atmosphäre (= Wind) und Strömungen im Ozean

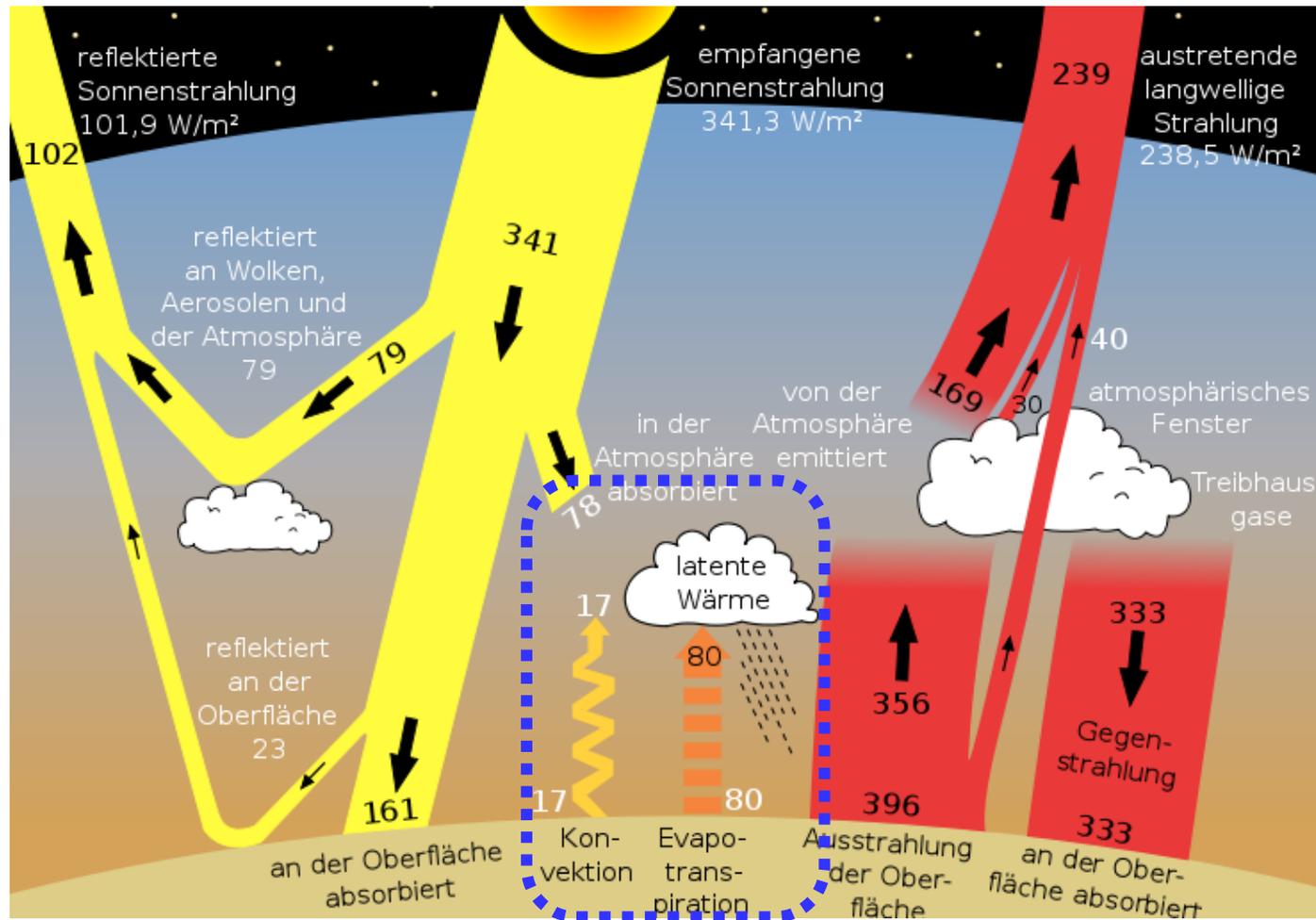


→ große Windsysteme (UnGGW)

(Quelle: Kraus, 2004)

6.5 Strahlungs- und Energiebilanz

- Energiebilanz: Ausgleich Strahlungsbilanz durch **Flüsse fühlbarer / latenter Wärme**



(Quelle: Klimawiki, u.a. CSC)

6.5 Strahlungs- und Energiebilanz

Energiebilanz der Erdoberfläche

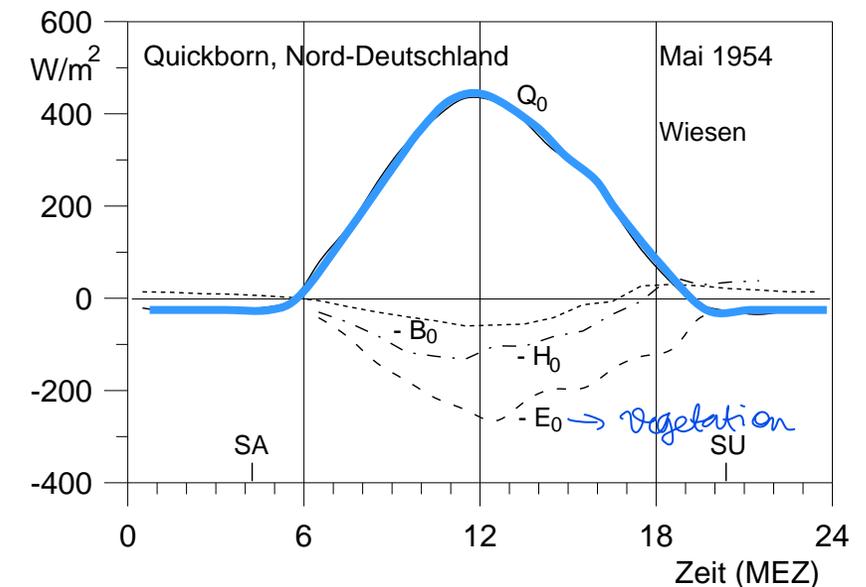
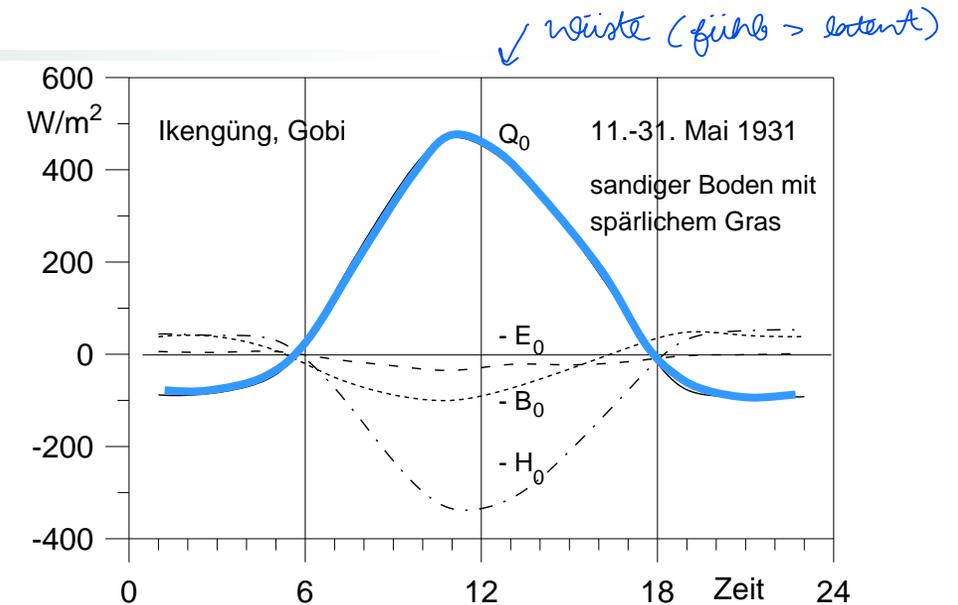
- Rund **60 %** der vom Erdboden absorbierten solaren Strahlung wird durch **Wärmeflüsse** in der Atmosphäre transportiert:
 - Turbulenter Fluss **fühlbarer** Wärme **H: 17 W m⁻² globales Mittel**
(wirbel)
 - Turbulenter Fluss **latenter** Wärme **E: 80 W m⁻² globales Mittel**
- Weitere Komponente Energiebilanz: **Bodenwärmestrom B** (auch: Wärmestrom im Meer)
 - im globalen Mittel $B = 0$ *(lokal ≠ 0)*
- Energiebilanz an der Oberfläche
$$Q + B + H + E = 0$$
- Energiebilanz ausgeglichen nur für eine 2D Oberfläche (in diesem Fall kein Speicherterm, z.B. Speicherung von Energie in Pflanzen)
- Sehr hohe räumliche Variabilität der einzelnen Terme durch Inhomogenitäten der Oberflächenart (z.B. Gewässer, Wiese, versiegelte Fläche) und –beschaffenheit (z.B. Rauigkeit, Topografie, Bewuchs, ...)

6.5 Strahlungs- und Energiebilanz

Energiebilanz der Erdoberfläche

- Turbulente Flüsse gleichen **über Landoberflächen** die Strahlungsbilanz weitgehend aus
- **Flüsse fühlbarer Wärme H und latenter Wärme E** tagsüber i.d.R. von der Erdoberfläche zur Atmosphäre gerichtet (negativ), nachts von der Atmosphäre zur Erdoberfläche (positiv)
- Über **vegetationslosen Böden (Wüste)** ist $|H| > |E|$
- Über **Vegetation** $|H| < |E|$

$$Q + B + H + E = 0$$



6.6 Optische Phänomene



Fragen über Fragen...

- Welche **optischen Erscheinungen in der Atmosphäre** kennen Sie? *Regenbogen, Polarlichter, Halo, Brokengespenst, Aeneiden*
- Wie entsteht eine **Fata Morgana**? *↳ ist real*
- Wie ist die **Lichtgeschwindigkeit** in Medien? Was ist die **Folge** davon? *geringer*





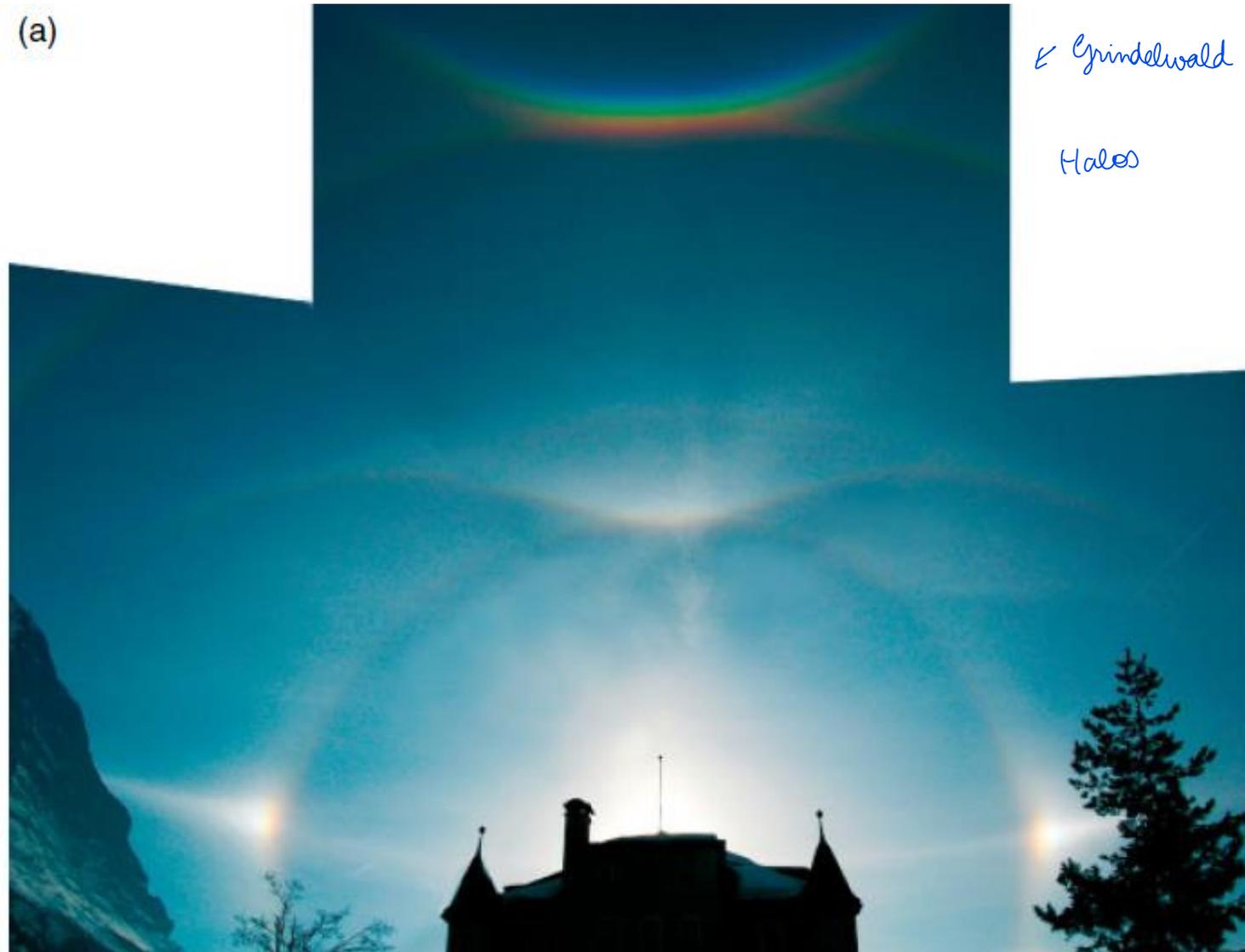






6.6 Optische Phänomene

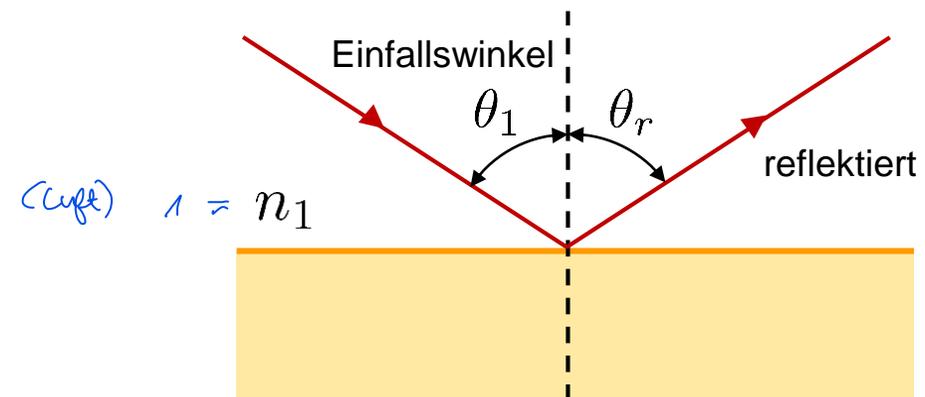
(a)



6.6 Optische Phänomene

Reflexion

- Treffen Wellen auf Grenzfläche zwischen zwei Medien (z.B. Spiegel), entstehen neue Wellen, die sich von der Grenzfläche wegbewegen (Huygensches Prinzip der Wellenausbreitung)
- Reflexionsgesetz: Ausfallswinkel = Einfallswinkel $\theta_r = \theta_1$
- Anteil der Energie, der an Grenzfläche reflektiert wird, hängt ab von Einfallswinkel, Orientierung elektrisches Feld der Welle und von Lichtgeschwindigkeit im Medium



6.6 Optische Phänomene

Brechung

- Verringerte Lichtgeschwindigkeit im Medium, abhängig von Brechzahl $n = \frac{c}{c_m}$ ← Lichtgeschw. Vakuum
 c_m ← Lichtgeschw. Medium
- Richtungsänderung des Strahls, der in Medium eindringt (wegen unterschiedlicher Lichtgeschwindigkeit im Medium c_m gegenüber c); Frequenz ν bleibt konstant; Brechung in Richtung Lot senkrecht in optisch dünnerem Medium

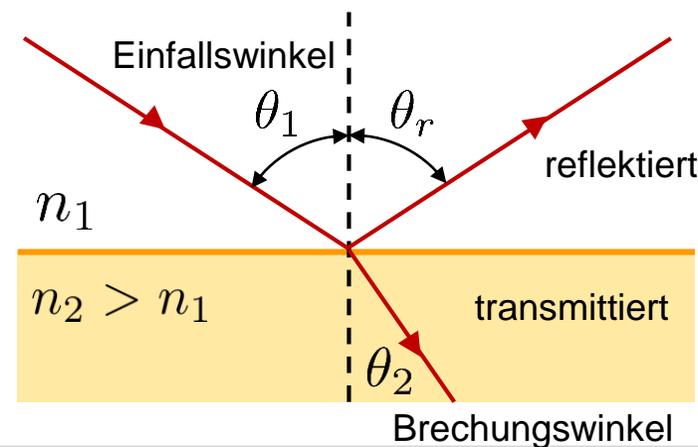
Änderung Wellenlänge $\lambda' = \frac{c_m}{\nu} = \frac{c/n}{\nu} = \frac{\lambda}{n}$

- Brechungsgesetz nach Snellius

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$



Willebrord van Roijen Snellius, niederländischer Astronom und Mathematiker (1580-1626)



6.6 Optische Phänomene

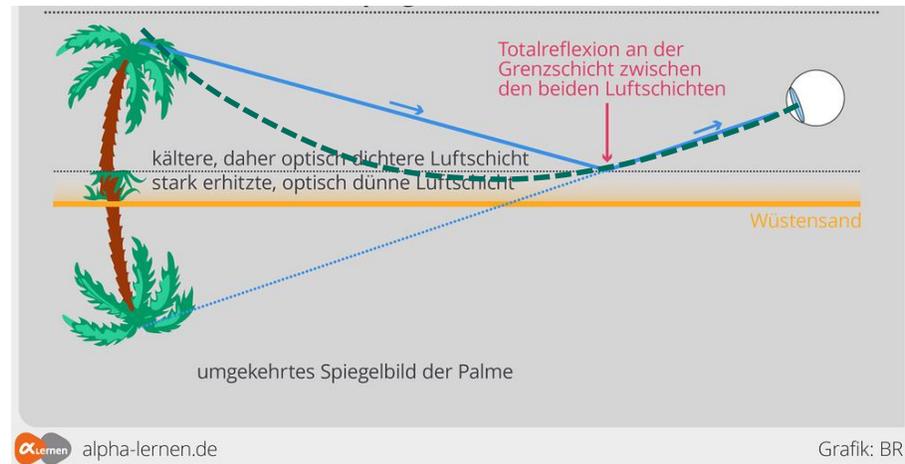
Brechung

- Verringerte Lichtgeschwindigkeit im Medium, abhängig von Brechzahl $n = \frac{c}{c_m}$ ← Lichtgeschw. Vakuum
 c_m ← Lichtgeschw. Medium
- Richtungsänderung des Strahls, der in Medium eindringt (wegen unterschiedlicher Lichtgeschwindigkeit im Medium c_m gegenüber c); Frequenz ν bleibt konstant; Brechung in Richtung Lot senkrecht in optisch dünnerem Medium

Änderung Wellenlänge $\lambda' = \frac{c_m}{\nu} = \frac{c/n}{\nu} = \frac{\lambda}{n}$

- Brechungsgesetz nach Snellius

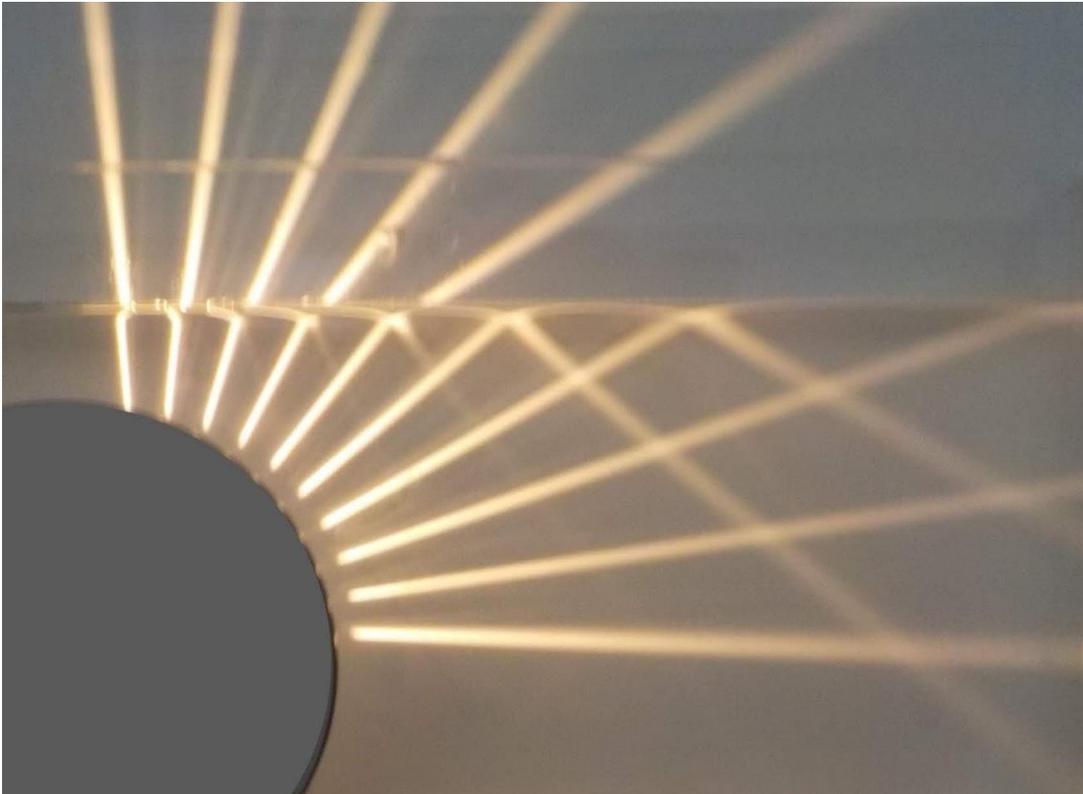
$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$



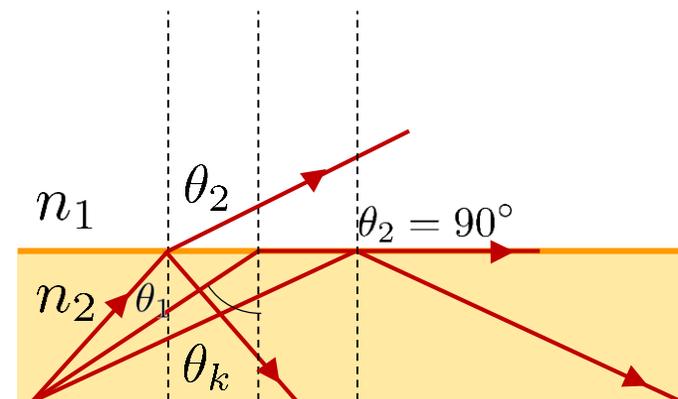
6.6 Optische Phänomene

Totalreflexion

- Übergang von optisch dichterem zu dünnerem Medium: Brechung von der Normalen weg; mit zunehmendem Einfallswinkel wird der Brechungswinkel größer; ab kritischem Winkel θ_k ($\theta_2 = 90^\circ$) erfolgt keine Brechung, sondern ausschließlich Reflexion: **Totalreflexion**



$$\sin \theta_k = \frac{n_2}{n_1} \rightarrow \text{ab da Totalreflexion}$$



6.6 Optische Phänomene

Dispersion

- (Geringfügige) **Abhängigkeit Brechzahl n von Wellenlänge λ**
 - längere Wellenlängen (rot) werden weniger stark gebrochen als kürzere (blau)
- Spektrale Zerlegung des Lichts beim Durchgang durch optisch dickeres Medium (dispergiert)



Fragen über Fragen...

- Welche Farben sind beim **Regenbogen** innen? *violett / blau*
Warum? *(λ kleiner, stärker gebrochen)*
- Wo steht die Sonne, wenn der **Regenbogen** vor einem
erscheint? *hinter einem*
- Gibt es **mehrere Regenbögen** (gleichzeitig)? *ja*

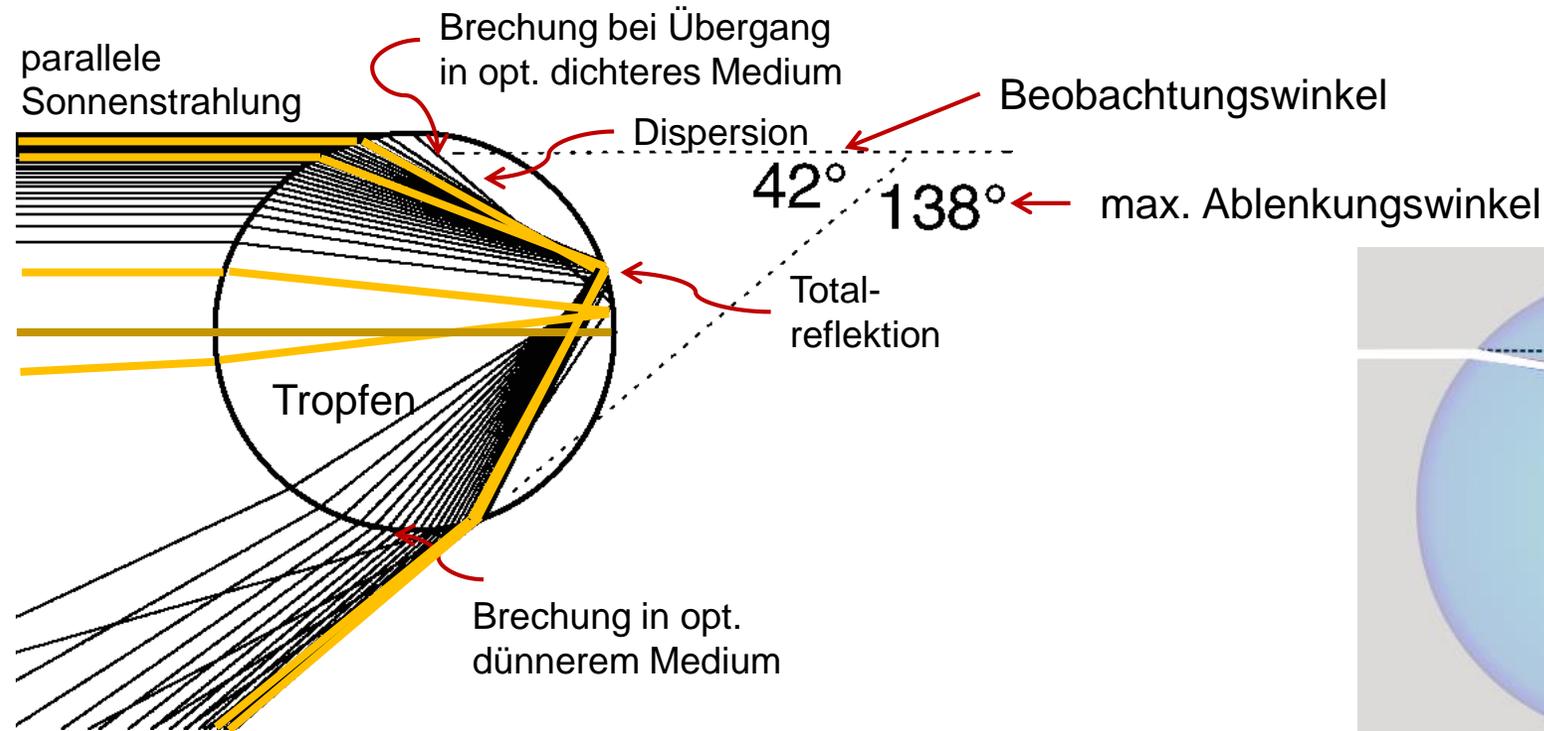
man man als geschlossenen Kreis sehen (z.B. im Flugzeug)

Fraunhoferlinien

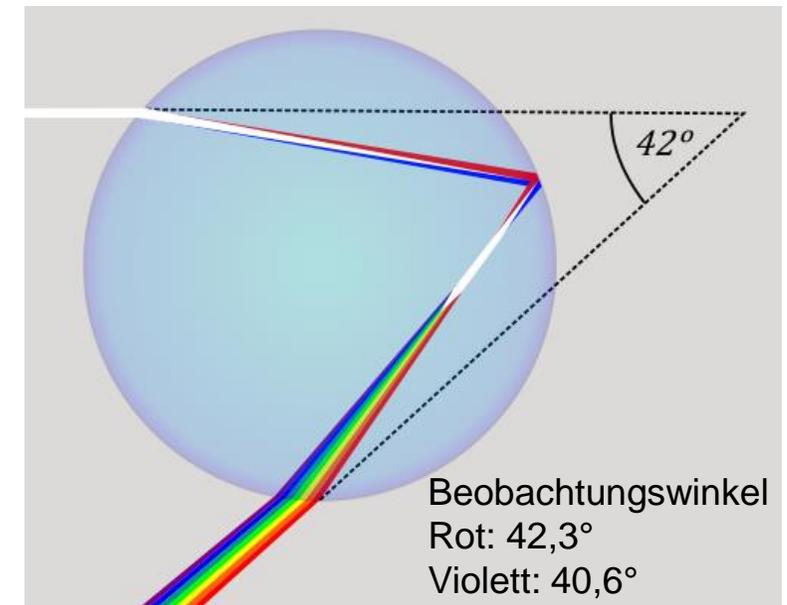
6.6 Optische Phänomene

Der Regenbogen

- Ursachen: - **Brechung/Totalreflexion** im Tropfen; max. Winkel: 42°
- **Dispersion**: rotes Licht wird weniger stark gebrochen

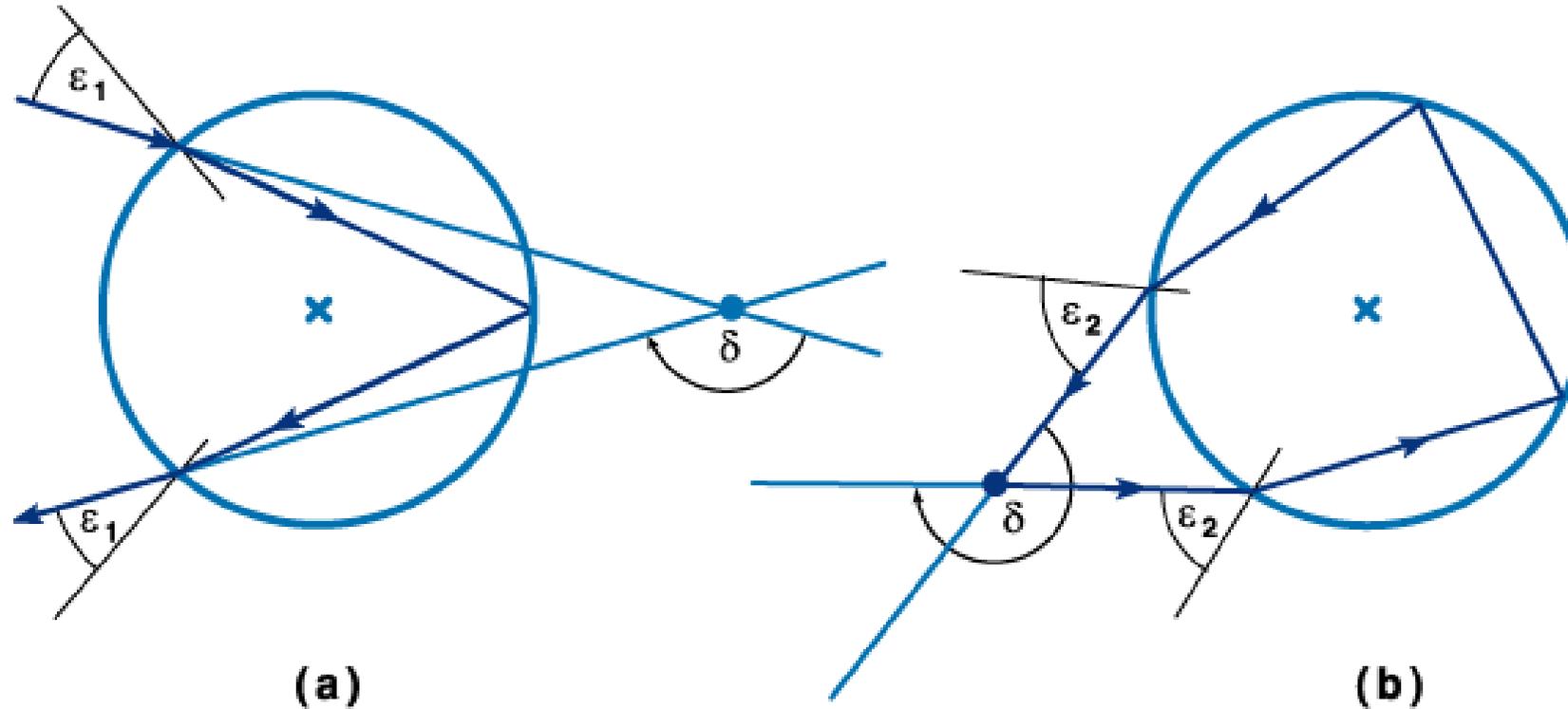


Maximaler Ablenkungswinkel, Häufung austretender Strahlen um diesen Winkel → Regenbogen wird sichtbar



6.6 Optische Phänomene

Der Regenbogen: möglicher Strahlengang als einfache oder zweifache Totalreflexion

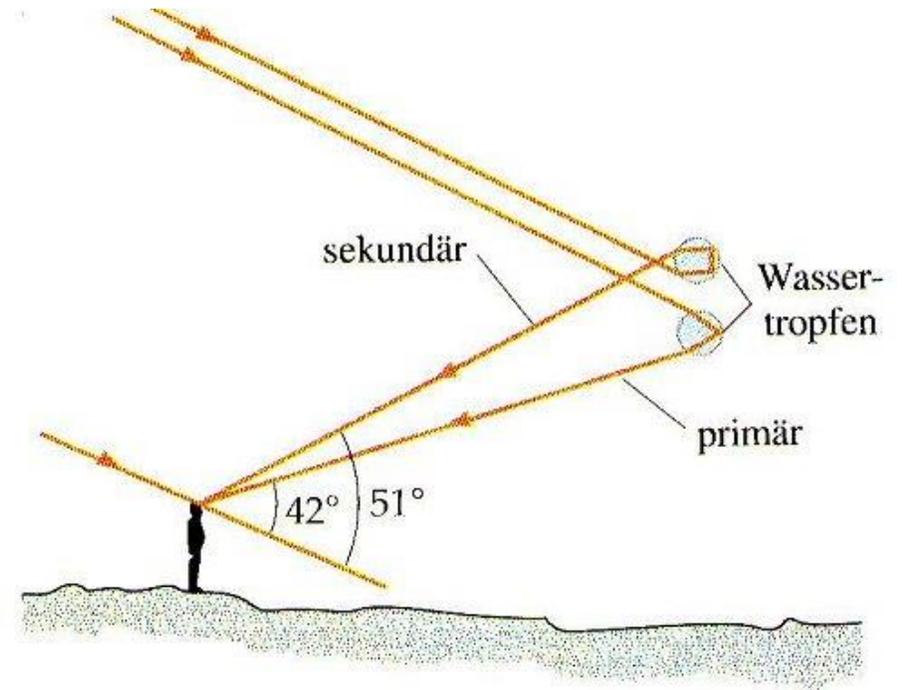
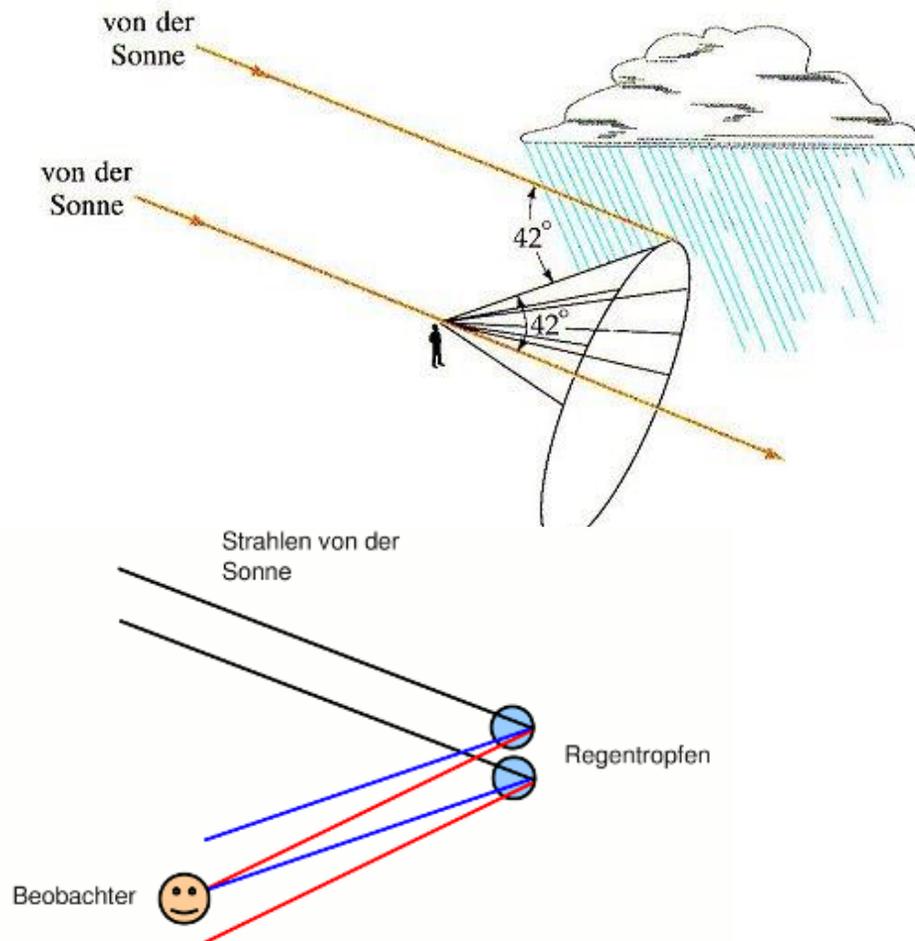


Sekundärer Regenbogen:

- Beobachtungswinkel 51°
- umgekehrte Farbreihenfolge
- schwächer wg. 2-facher Reflexion

6.6 Optische Phänomene

Der Regenbogen: Beobachtung



(Quelle: Tipler, Physik)

6.6 Optische Phänomene

$$\frac{d\phi_A}{d\theta_1} = 0$$

Der primäre Regenbogen: geometrische Optik

(1) Brechungsgesetz Snellius: $n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$

(2) Ablenkungswinkel: $\phi_A + 2\beta = \pi$

(3) Dreieck AOB: $2\theta_2 + \alpha = \pi$

(4) Dreieck AOP: $\theta_1 + \beta + \alpha = \pi$

(4) auflösen nach β , (3) auflösen nach α und einsetzen

$$\beta = \pi - \theta_1 - \alpha = \pi - \theta_1 - (\pi - 2\theta_2) = 2\theta_2 - \theta_1$$

einsetzen in (2) aufgelöst nach Ablenkungswinkel ϕ_A

$$\phi_A = \pi - 2\beta = \pi - 2(2\theta_2 - \theta_1) = \pi + 2\theta_1 - 4\theta_2$$

Kombination mit (1), eliminieren von θ_2 $\theta_2 = \arcsin\left(\frac{n_1}{n_2} \sin \theta_1\right)$

$$\Rightarrow \phi_A = \pi + 2\theta_1 - 4 \arcsin\left(\frac{n_1}{n_2} \sin \theta_1\right)$$

Ablenkungswinkel

$$2\beta = \pi - \phi_{A,min}$$

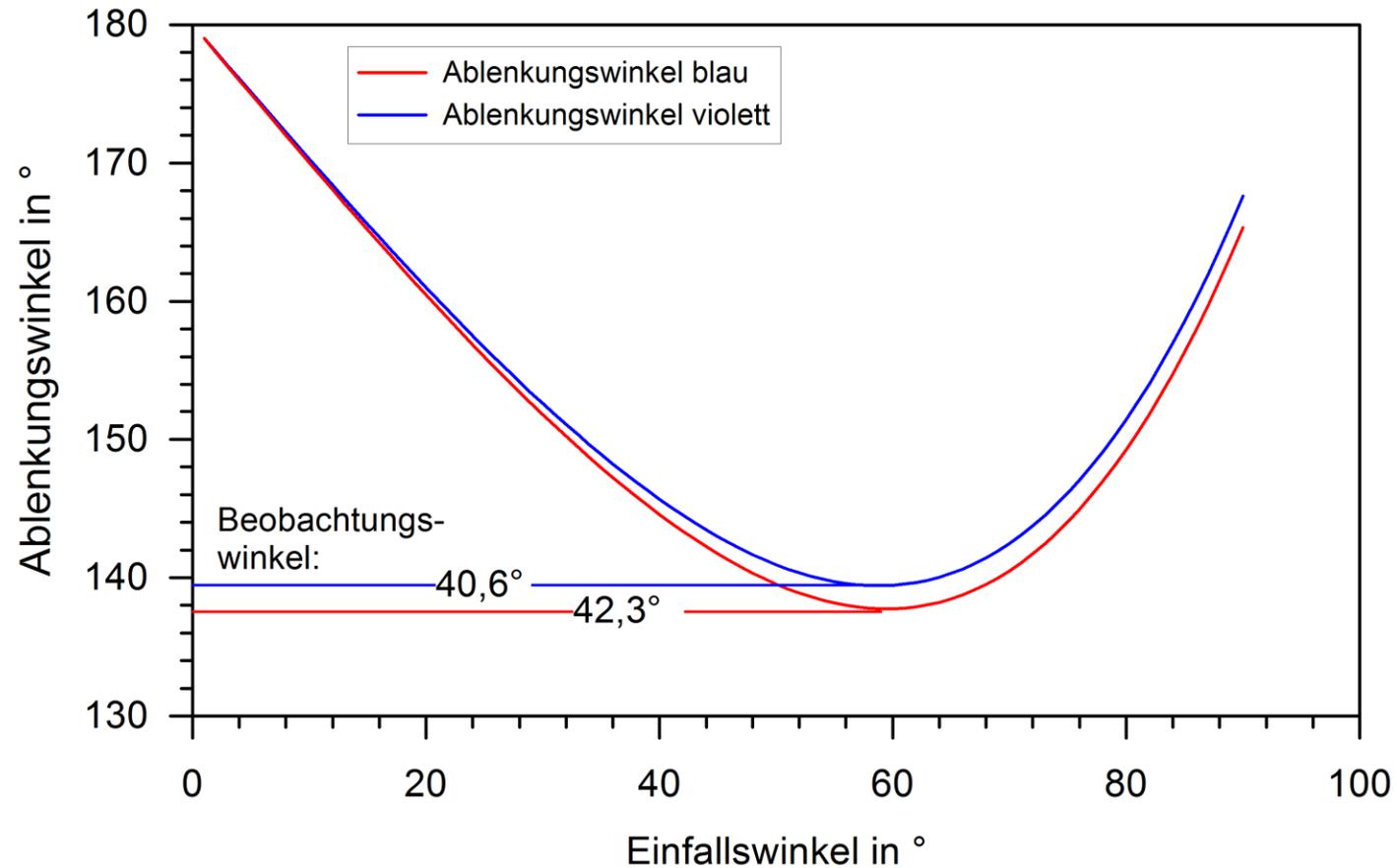
Beobachtungswinkel

← vorher Diff für versch- λ ?

6.6 Optische Phänomene

Der Regenbogen: geometrische Optik

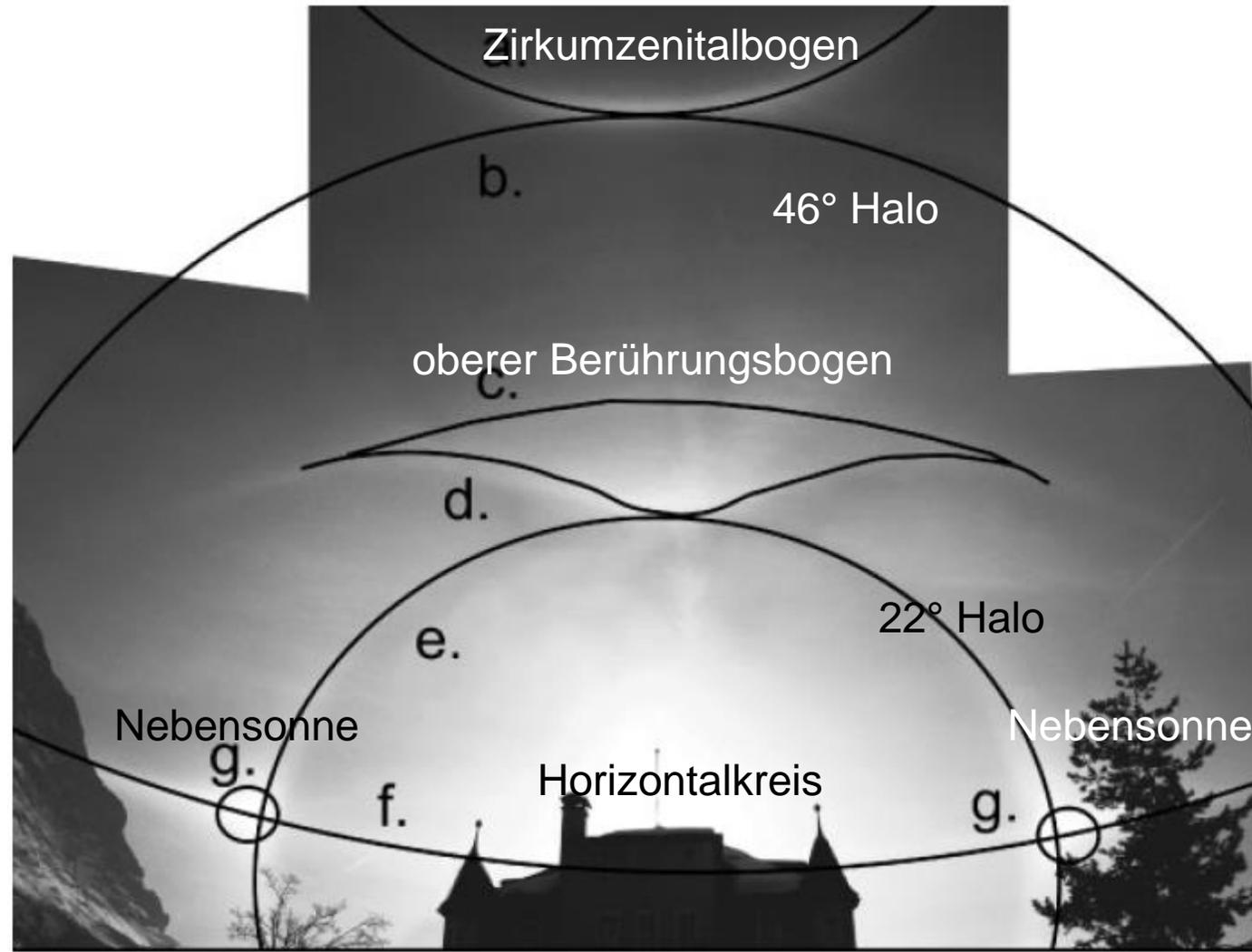
Minimaler Ablenkungswinkel $\phi_A \approx 138^\circ$; Beobachtungswinkel $2\beta \approx 42^\circ$



Fragen über Fragen...

- Was ist der fundamentale Unterschied zwischen **Halos** und **Regenbögen**?
- Wodurch entstehen **Halos**?
- Wieso gibt es verschiedene Halos an verschiedenen **Orten/Winkel** des Himmels?

6.6 Optische Phänomene



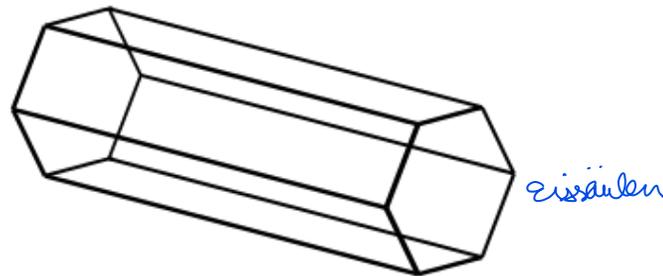
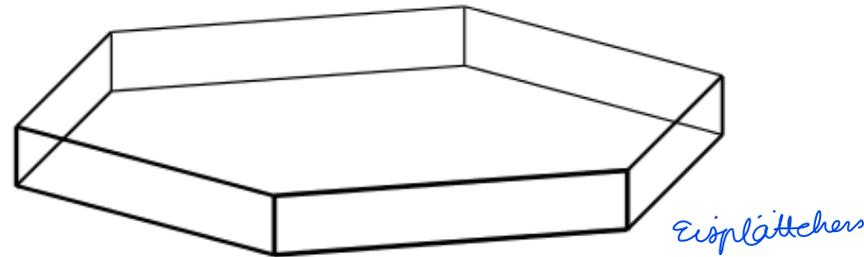
bei Sonnenuntergang: Nebensonnen weiter auseinander

(Schipper und Mühr, Weather, 2010)

6.6 Optische Phänomene

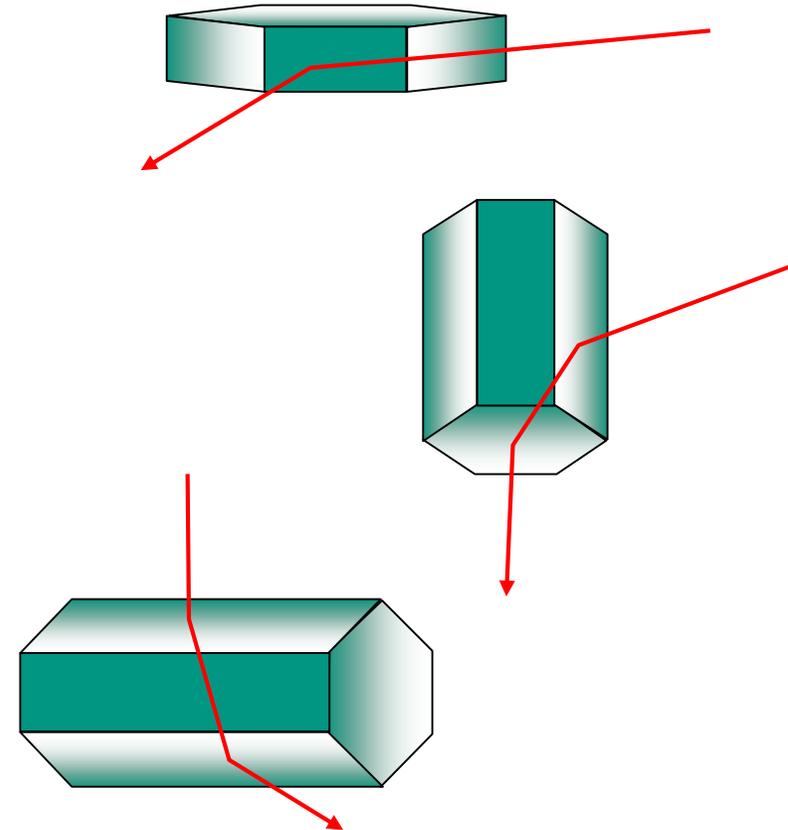
Halos und ihre Ursachen

Eiskristalle: Plättchen und Säulen
60° Winkel zwischen Flächen



~ 20 µm

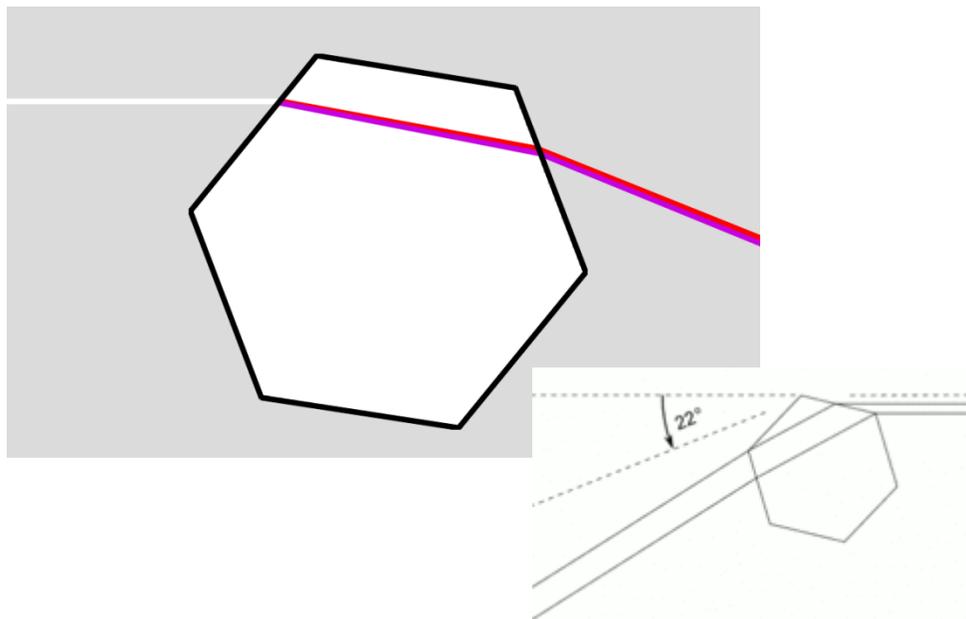
Mögliche Strahlenwege



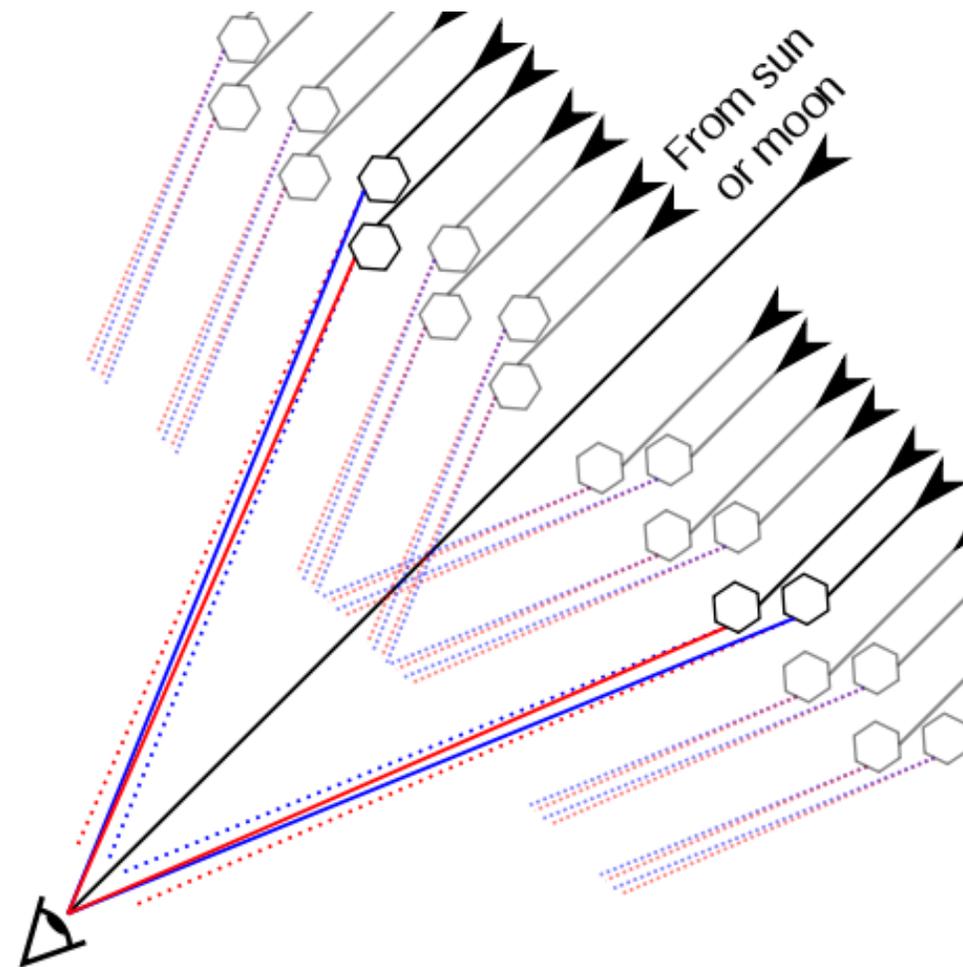
nicht mit Totalrefl.
→ Halos um Sonne
(nicht wenn Sonne
im Rücken wie bei
Regenbogen)

6.6 Optische Phänomene

22° Halo



- Brechung u. leichte Dispersion im hexagonalen Kristall
- maximaler Beobachtungswinkel 22°
 - Innenrand schimmert rötlich

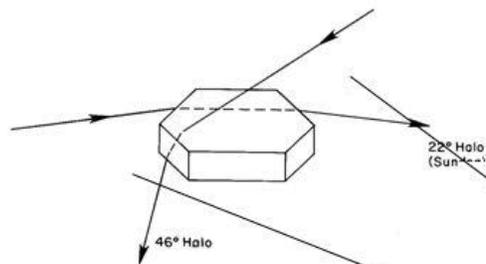


(Abbildung: wikipedia)

6.6 Optische Phänomene

46° Halo

HALO

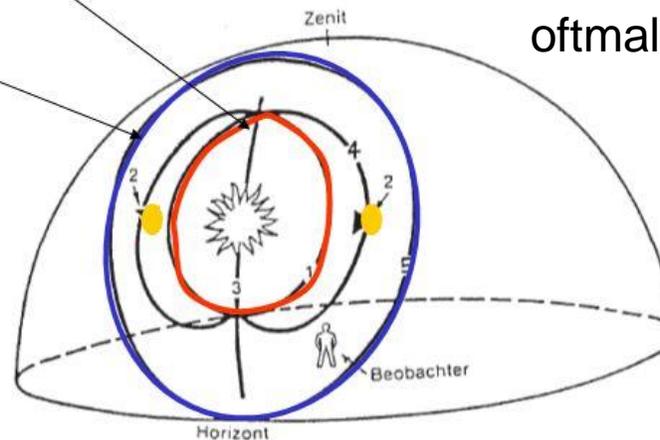


Lichtstrahl durchläuft eine Seitenfläche und die Ober- oder Unterseite des Kristalls.

→ Das Minimum der Ablenkung in diesem Strahlengang ist 46°, weshalb der Ring genau hier am hellsten ist

Stärkere Dispersion, daher oftmals farbiger

kleiner Ring 22°
großer Ring 46°
Nebensonne (senkrechte Lage des Kristalls)



6.6 Optische Phänomene

Halos und ihre Ursachen



Wir fassen zusammen...

- **Energiebilanz:** $Q + B + H + E = 0$ i.d.R. ausgeglichen; lokal nicht unbedingt
- **Reflexionsgesetz:** Ausfallswinkel = Einfallswinkel
- **Brechung:** Richtungsänderung des Strahls, der in Medium eindringt
Brechungsgesetz nach Snellius
- **Totalreflexion** ab θ_k bei Übergang von optisch dichterem zu dünnerem Medium
- **Dispersion:** Abhängigkeit Brechzahl n von Wellenlänge $\lambda \rightarrow$ kurze Wellenlängen (violett) werden stärker gebrochen als lange (rot)
- **Regenbogen:** Brechung/Totalreflexion im Tropfen; max. Beobachtungswinkel: 42° ; rotes Licht wird weniger stark gebrochen als violettes
- Primärer / sekundärer **Regenbogen**
- **Haloerscheinungen:** unterschiedlicher Strahldurchgang durch Plättchen und Säulen, unterschiedliche Art und Ausrichtung der Eisteilchen \rightarrow verschiedene Halos

