Wolken und Niederschlag: Physik mit Wirkung

THEORIE / DEFINITION



Leitfragen

Warum schützt gefrierendes Wasser Blüten?

Wie entstehen Wolken, Regen und Hagel?

Was verrät ein Wetterballon?



Marc Krebsbach
Tel. : +49 (0)202 439-3503
E-Mail : m.krebsbach@uni-wuppertal.de

NASA: Formation and Spread of Aircraft-Induced Holes in Clouds

Frostberegnung: Welche Energiebilanz schützt die Blüte?

FRAGE / DISKUSSION



Beobachtung

Obstblüten werden bei Frost mit Wasser besprüht.

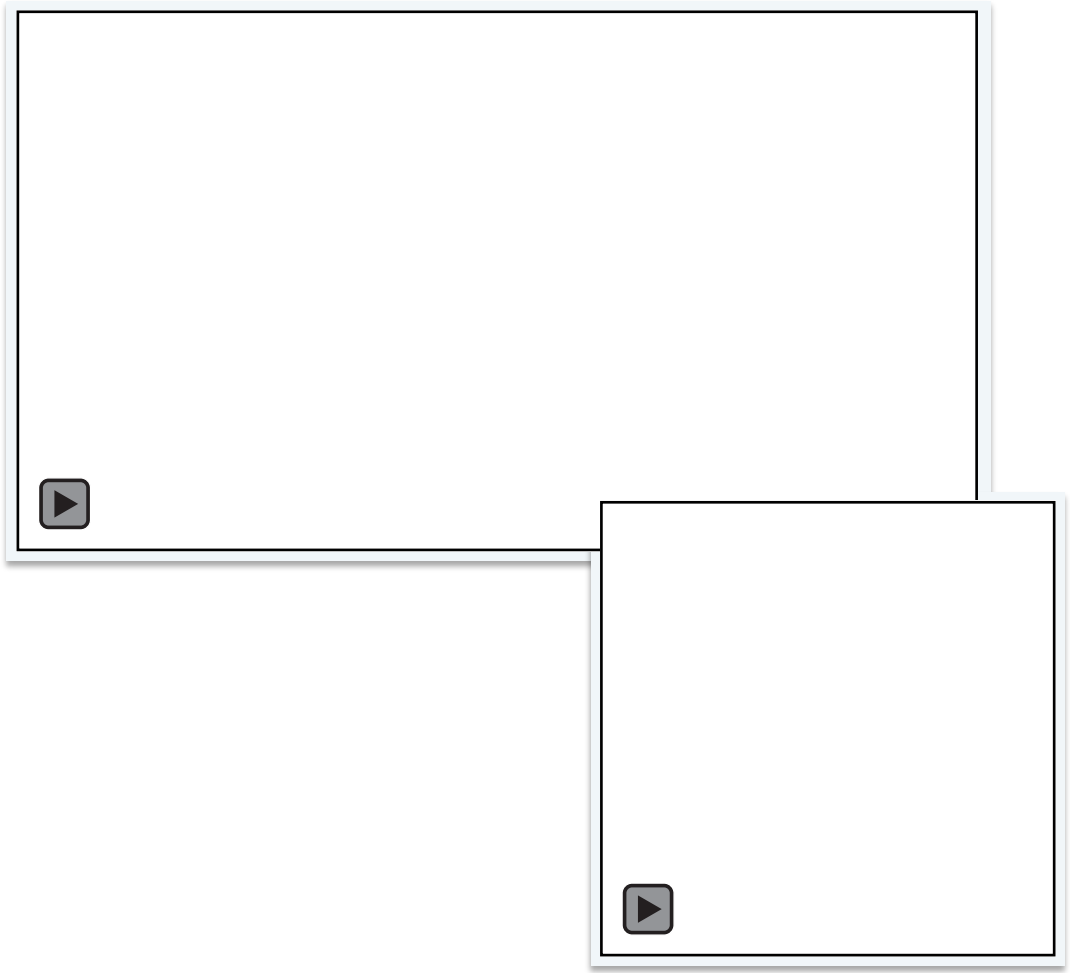
Welche Prozesse führen Energie zu, welche entziehen Energie?

Kann ein Prozess, bei dem Eis entsteht, vor Frostschäden schützen?

© 2013 Pearson Education

Unterkühltes Wasser: Gefrieren kann erwärmen

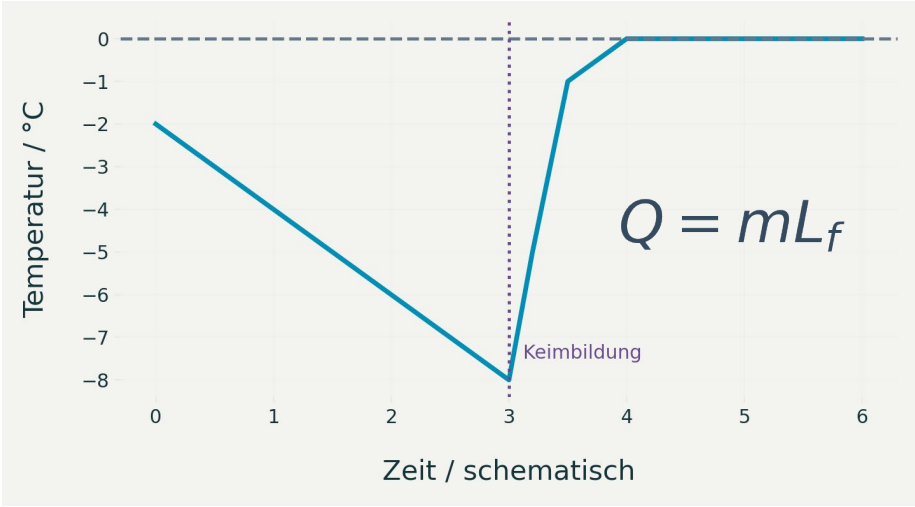
ANTWORT / ANWENDUNG



Beobachtungsauftrag

Das Wasser war bereits unter 0 °C kalt. Warum war es trotzdem noch flüssig?

Beim Gefrieren wird Erstarrungswärme frei. Was bedeutet das für die Temperatur des zunächst unterkühlten Wassers?

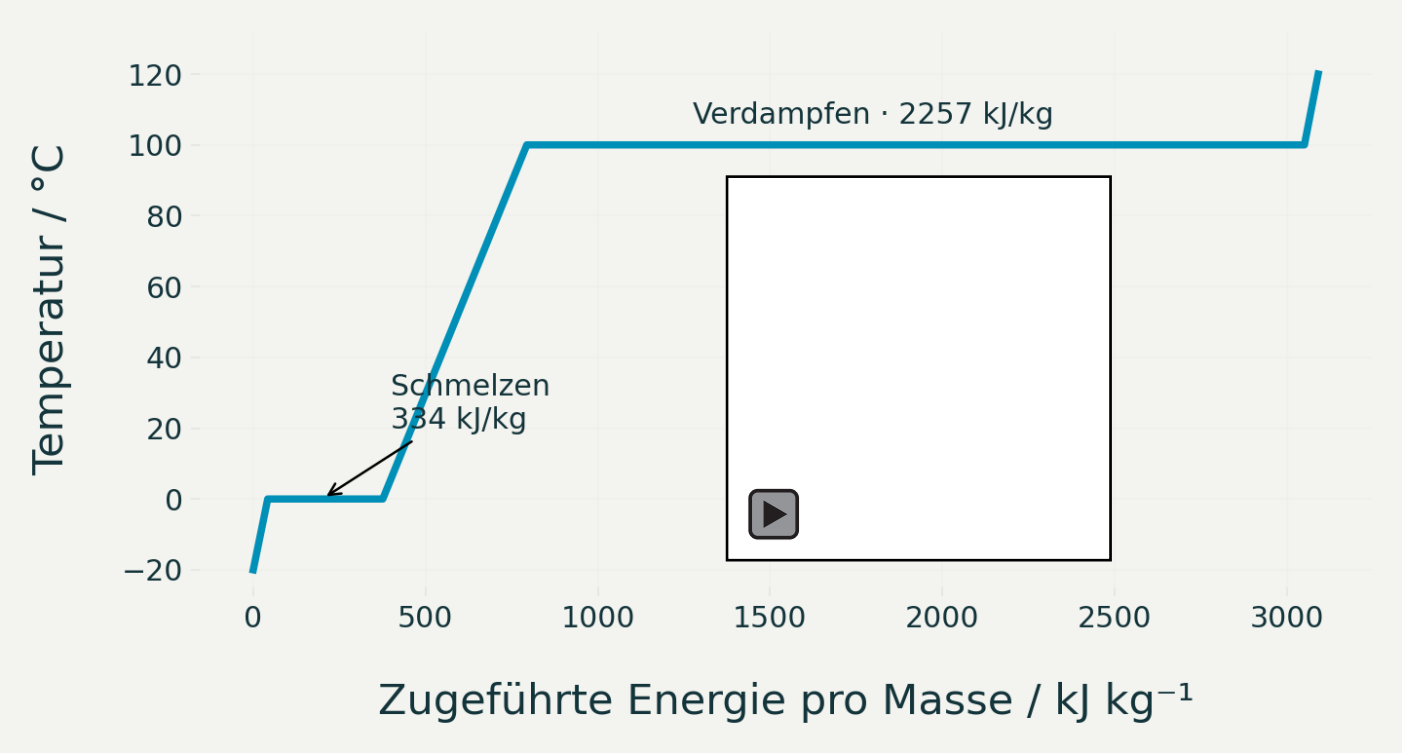


Erstarrungswärme kann die unterkühlte Probe in Richtung 0 °C erwärmen.

https://www.youtube.com/watch?v=y74hYugJkgk

Phasenübergänge: Energiezufuhr ohne Temperaturanstieg

THEORIE / DEFINITION



Sensible / latente Wärme

Steigende Abschnitte:
Temperaturänderung

Plateaus:
Phasenumwandlung

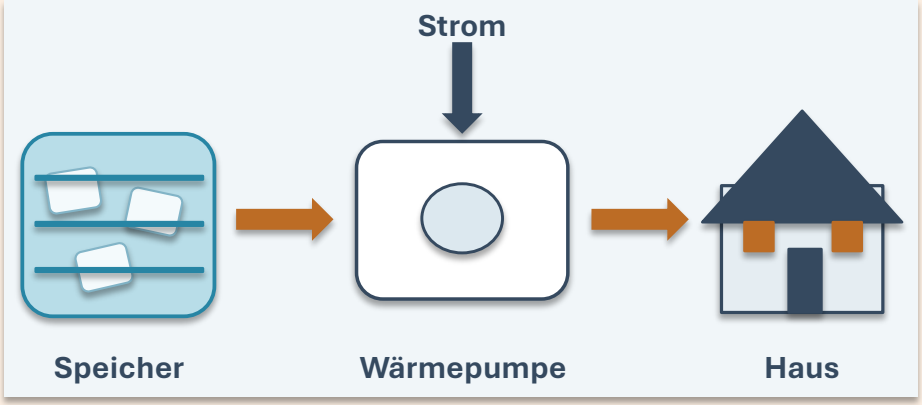
Reiner Stoff · konstanter Druck · näherungsweises Phasengleichgewicht.

https://www.youtube.com/watch?v=r0ljhfKXkrg

Eisspeicher: derselbe Phasenwechsel zum Heizen und Kühlen

ANTWORT / ANWENDUNG

Heizbetrieb: Wasser → Eis

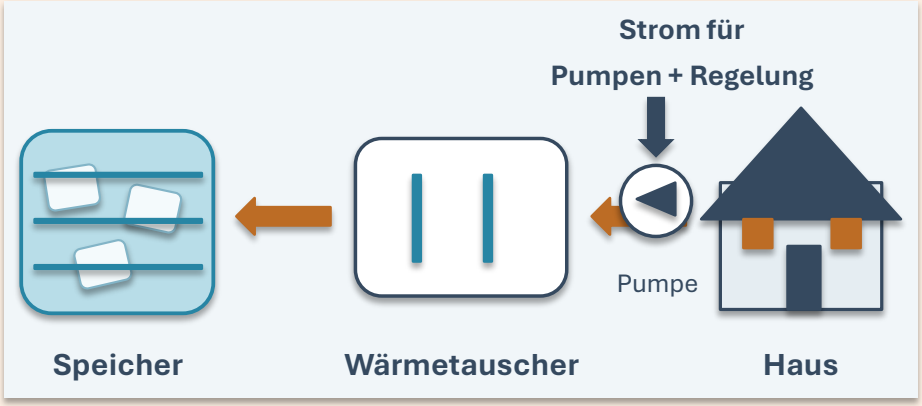


Wärme vom Speicher zum Haus

Wasser gefriert und gibt Energie ab.

Die Wärmepumpe benötigt elektrische Energie.

Kühlbetrieb: Eis → Wasser



Wärme vom Haus zum Eis

Eisspeicher schmilzt und nimmt Energie auf (Regeneration).

Strom für Pumpen und Regelung.

Ein Energiespeicher, keine Energiequelle ohne Aufwand.

Frostschutz: Wärme freisetzen, verteilen oder zuführen

ANTWORT / ANWENDUNG

Beregnung

Gefrieren setzt Wärme frei.

Ausreichende Wasserzufuhr nötig; Verdunstung kühlt zugleich.



Rotoren

Mischen wärmerer Höhenluft in die kalte Bodenschicht.

Geeignete Inversion nötig.



Obstgartenheizer

Führen Wärme zu.

Wirksam unter passenden Bedingungen; hoher Brennstoffbedarf.



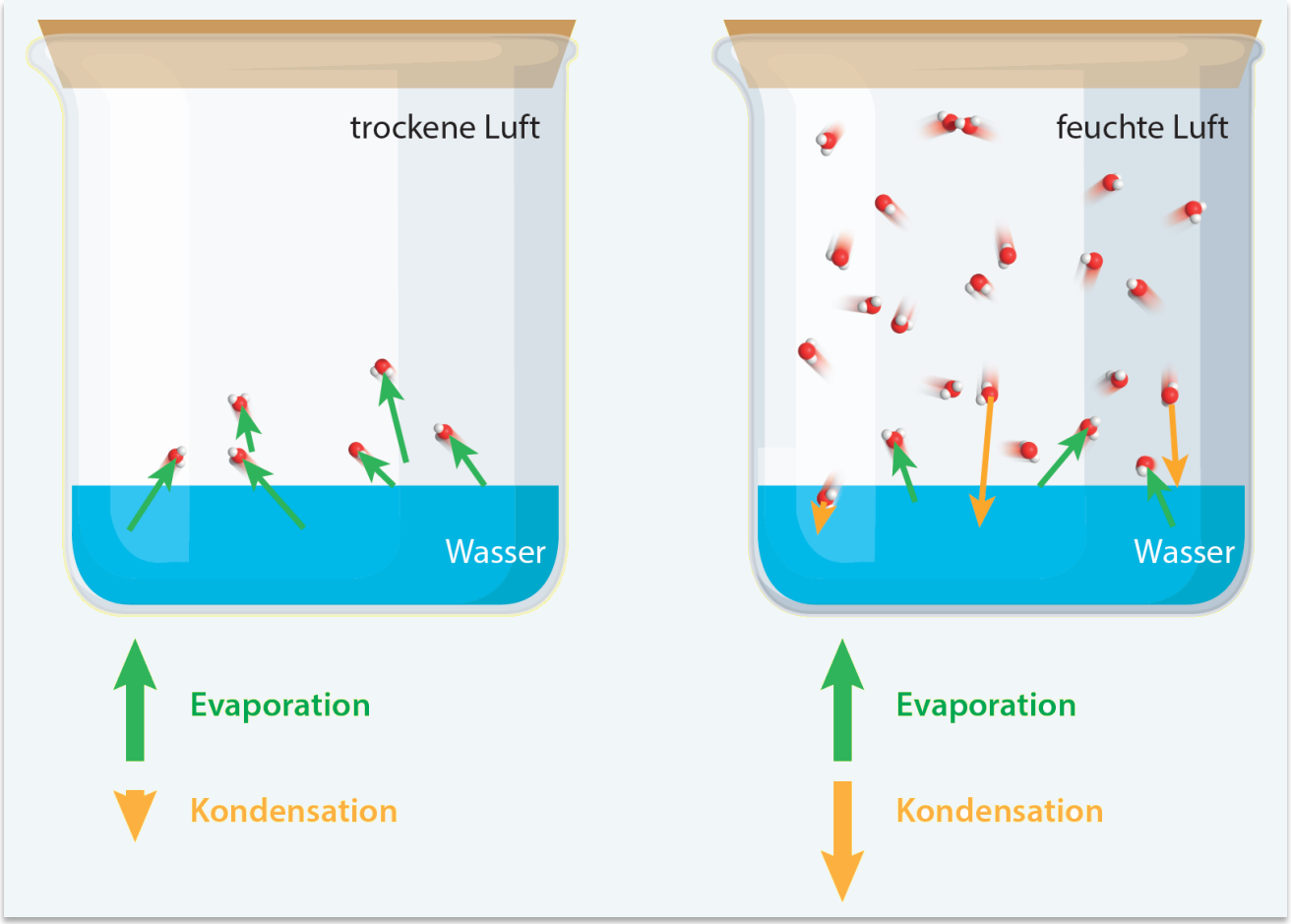
Gefrierwärme und Wärmeverluste müssen bilanziert werden.

© Peason Education, Inc.

Verdunstung und Kondensation: dynamisches Gleichgewicht

THEORIE / DEFINITION

anfangs: nahezu trockener Gasraum



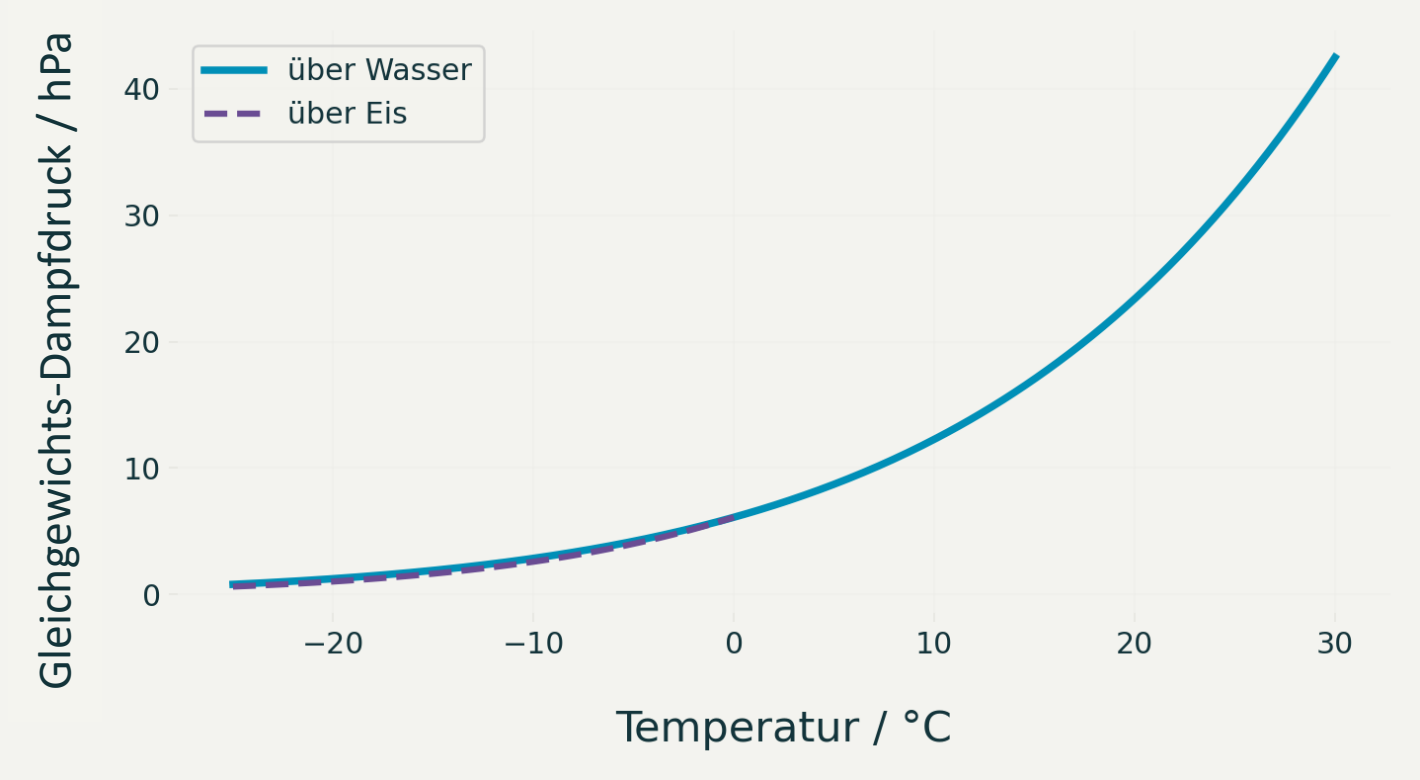
später: gesättigter Gasraum

Nicht der Austausch endet, sondern der Nettotransport wird null.

Krebsbach und Koppmann, 202x)

Temperatur und Phase bestimmen den Gleichgewichtsdruck

THEORIE / DEFINITION



Zwei Aussagen

T steigt → Gleichgewichts-Dampfdruck steigt.

Unter 0 °C liegt der Wert über Eis niedriger als über unterkühltem Wasser.

Dampfdruck und Sättigung: kein „Luftschwamm“

THEORIE / DEFINITION

$$p = p_d + e$$

Sättigungsdampfdruck

Wasserdampf-Partialdruck im Gleichgewicht mit einer festgelegten Oberfläche bei Temperatur T.

Sättigung beschreibt ein Phasengleichgewicht – keine vollständig mit Wasser „gefüllte“ Luft.

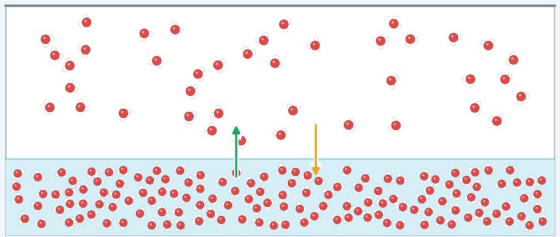
Kann wärmere Luft mehr Wasserdampf aufnehmen als kältere?

Bei höherer Temperatur ist der Gleichgewichts-Dampfdruck über derselben Oberfläche größer.

Gleiche Temperatur – unterschiedliche Gleichgewichte

BEISPIEL BEI –10 °C · EBENE OBERFLÄCHEN · DREI GETRENNTE GLEICHGEWICHTE

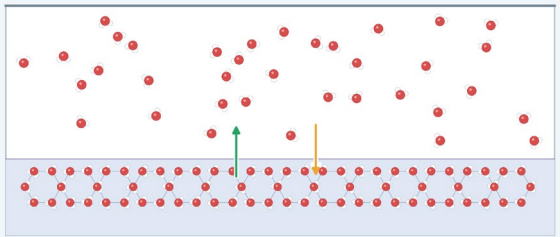
Unterkühltes Wasser



$e_{eq} \approx 2{,}87$ hPa

Referenz: 100 %

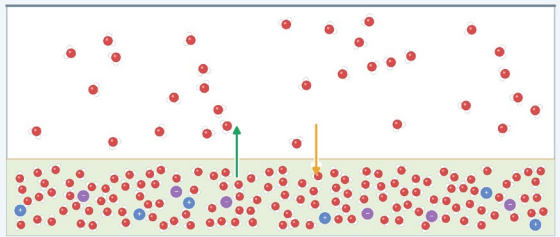
Eis



$e_{eq} \approx 2{,}60$ hPa

rund 9 % niedriger

Salzlösung

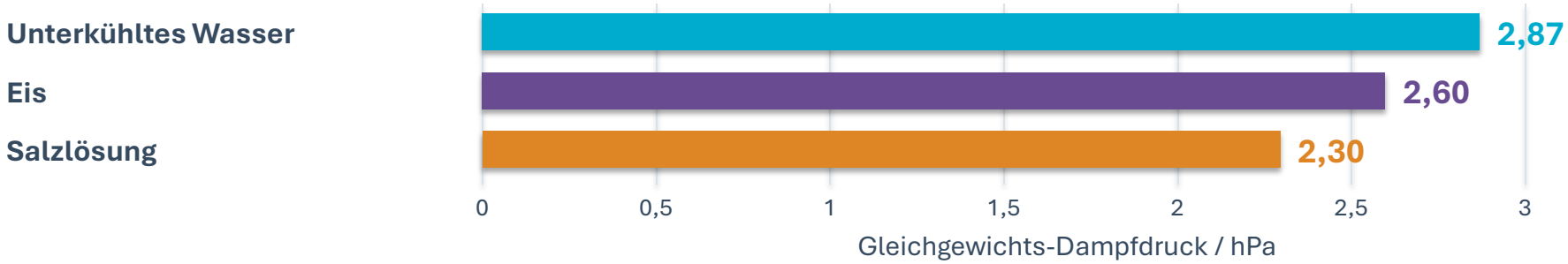


$e_{eq} \approx 2{,}30$ hPa

$a_w = 0{,}80$ · 20 % niedriger

Rot/weiß: H_2O in allen Phasen · + / −: gelöste Ionen · Pfeilpaar: gleich großer Austausch in beide Richtungen

Direkter Vergleich auf derselben Skala



Gleichgewicht: Verdunstung und Kondensation sind gleich schnell. Gleich großer Austausch – nicht gleiche Dampfmenge.

Wasser / Lösung: Verdunstung ⇌ Kondensation · Eis: Sublimation ⇌ Deposition

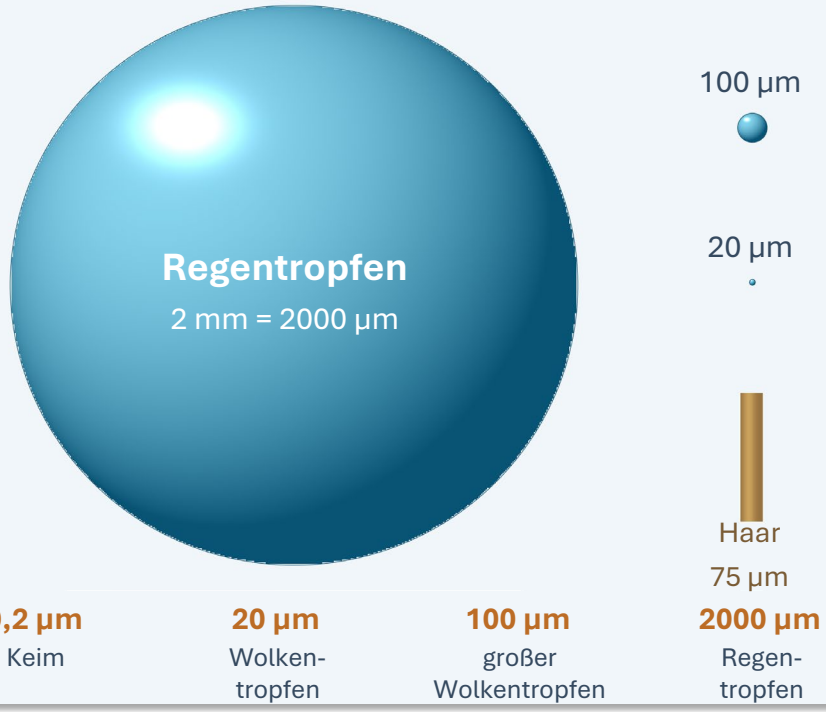
Die Position der Salzlösung hängt von ihrer Wasseraktivität ab. Die Reihenfolge gilt für dieses Beispiel.

Molekülmodell schematisch: Größen, Abstände und Phasendichten nicht maßstäblich; kein maßstäbliches Eiskristallgitter. Ionenanzahl ist keine Konzentrationsangabe.

Kelvin-Effekt: kleine Tropfen benötigen einen höheren Gleichgewichts-Dampfdruck

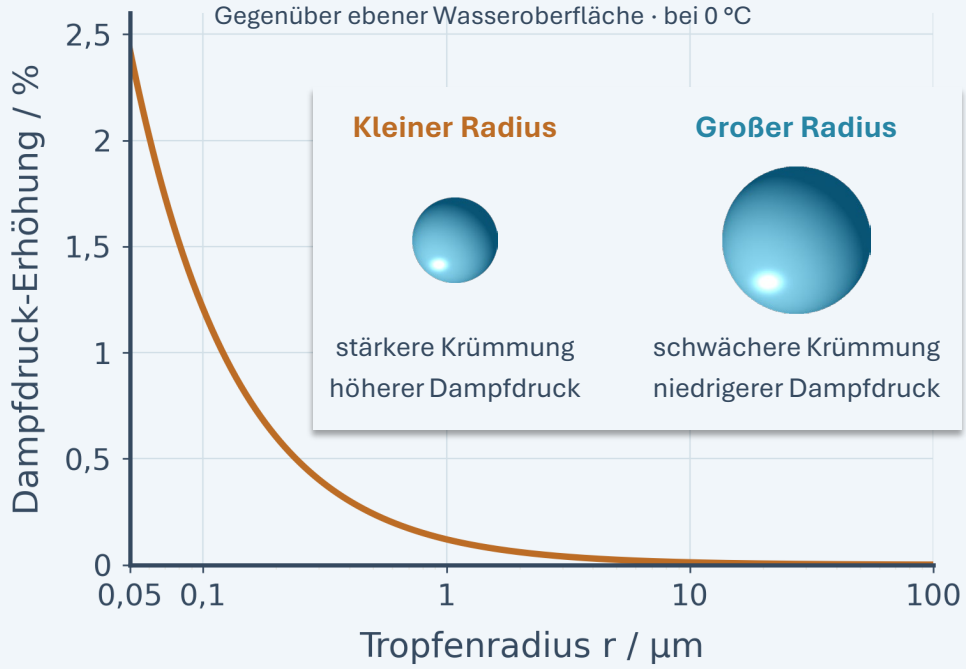
GLEICHE TEMPERATUR · REINES WASSER · KONVEXE OBERFLÄCHE

Regentropfen als Bezug



Durchmesser. Keim im Maßstab nicht sichtbar.

Der Einfluss des Radius



Kleiner Radius → stärkere Krümmung → höherer Gleichgewichtsdampfdruck.

Klein verdunstet, groß wächst – nur bei passendem Umgebungsdampfdruck:
Bei anderen Dampfdruckwerten können auch beide Tropfen wachsen oder verdunsten.

$$e_{eq,\,groß} < e_{Umgebung} < e_{eq,\,klein}$$

Eigene Grafiken · Haar: 75 µm als Beispiel. Inset schematisch.

Getränkekühlung: Verdunsten oder Schmelzen?

ANTWORT / ANWENDUNG

Nasses Tuch



Wasserdampf

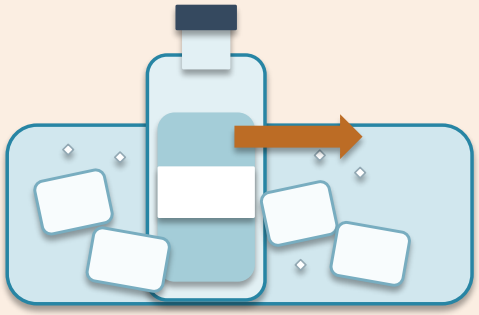
Verdunstung entzieht Wärme

Getränk kühlt ab

Nettoverdunstung: Der Gleichgewichts-Dampfdruck an der Oberfläche ist höher als der Umgebungsdampfdruck.

Verdunsten entzieht Wärme.

Eis-Wasser-Salz



Eis + Salz

Wärme fließt vom Getränk zum Eis

Eis schmilzt · Getränk kühlt ab

Salz senkt die Gefriertemperatur. → Eis kann unter 0 °C schmelzen

Schmelzen benötigt Energie – Gemisch kühlt ab.

Dem wärmeren Getränk wird Wärme entzogen.

Schmelzendes Eis nimmt Wärme auf.

Ähnlicher Alltagsnutzen – unterschiedliche thermodynamische Mechanismen.

Kann Wäsche bei Frost trocknen?

FRAGE / DISKUSSION

Ausgangslage

Die Wäsche ist gefroren.
Die Lufttemperatur liegt unter 0 °C.

Kann sie trotzdem trocknen?



Foto: Reuters, via SPIEGEL ONLINE: „Wieso trocknet Wäsche bei Frost?“, 26.12.2006.

Relative Feuchte: Bezugsphase und Oberflächentemperatur

ANTWORT / ANWENDUNG

$$\mathrm{RH}_w = 100\,\% \frac{e}{e_{s,w}(T)}$$

$$\mathrm{RH}_i = 100\,\% \frac{e}{e_{s,i}(T)}$$

Auflösung der Wäschefrage

Sublimation kann Wasser entfernen, wenn der Umgebungsdampfdruck unter dem Gleichgewichtswert über der Eisoberfläche liegt.

Nicht Frost allein entscheidet, sondern Dampfdruckgefälle, Oberfläche und Transport.

Feuchtegrößen – Mischungsverhältnis und Taupunkt

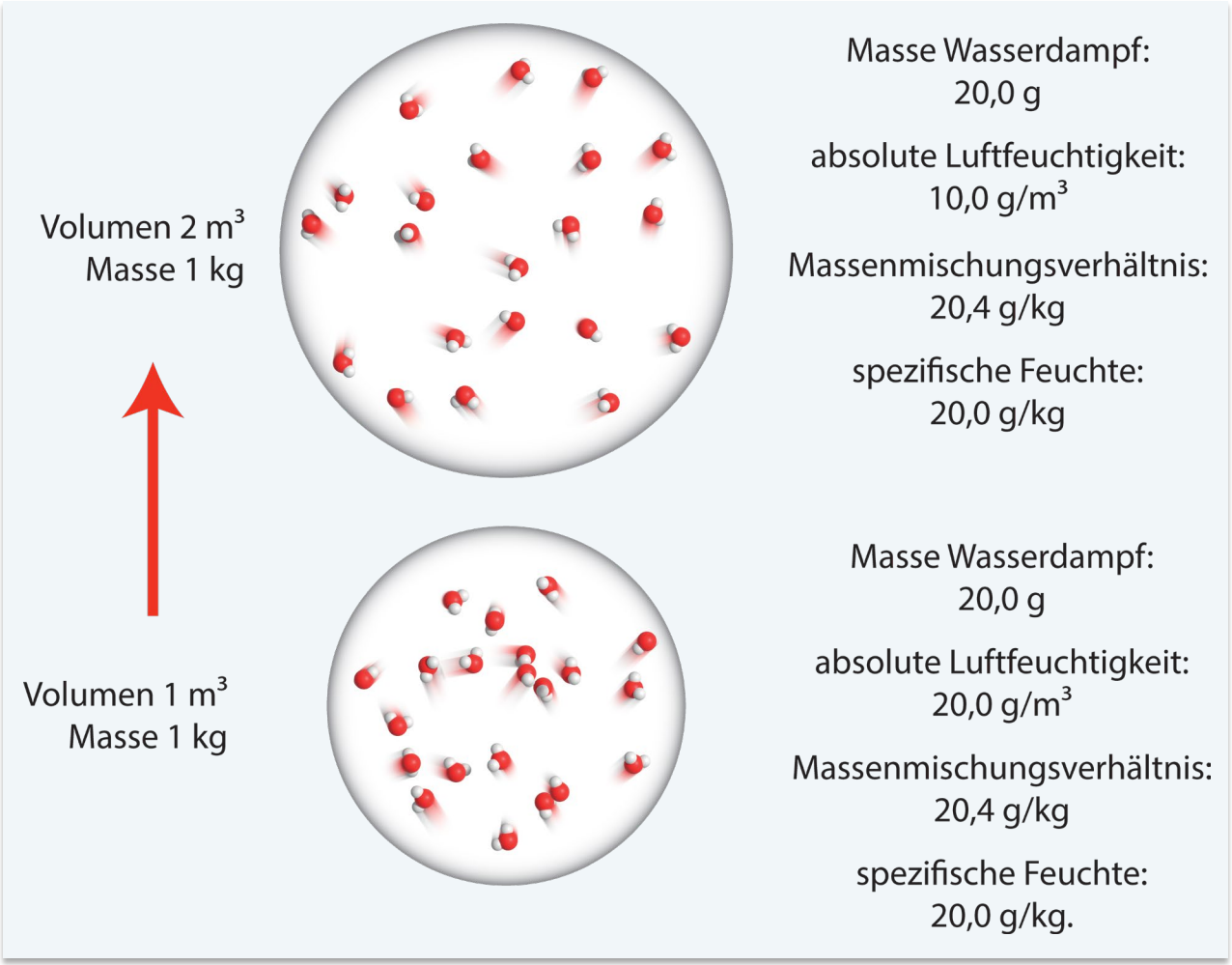
THEORIE / DEFINITION

Mischungsverhältnis — Wasserdampfmasse je Masse trockener Luft; meist in g/kg angegeben.

$$r = \frac{m_v}{m_d}$$

Taupunkt — Temperatur, bei der ein Luftpaket bei konstantem Druck und unverändertem Wasserdampfgehalt Sättigung über Wasser erreicht.

$$e = e_{s,w}(T_d)$$



Krebsbach und Koppmann, 202x

Warum werden Lippen im Winter häufig spröde?

FRAGE / DISKUSSION

Überlegt zunächst

Außen: 0 °C und 80 % relative Feuchte.
Im Raum: Erwärmung auf 20 °C ohne Feuchteänderung.
Was geschieht mit e, $e_s(T)$, RH und T_d?

Gemeinsame Auflösung

e bleibt bei etwa 4,9 hPa, T_d bleibt gleich.
Der Sättigungsdampfdruck steigt von etwa 6,1 auf 23,4 hPa.
Damit sinkt RH auf etwa 21 % – ohne Wasser zu entfernen.

Warum kühlt ein aufsteigendes Luftpaket ab?

THEORIE / DEFINITION

Mechanismus

Höhe ↑ → Außendruck ↓

Luftpaket expandiert und leistet Arbeit.

Adiabatische Näherung

Kein Wärmeaustausch mit der Umgebung.

Expansion senkt die Temperatur.

$$\mathrm{d}U = \delta Q - p_{\mathrm{ext}}\,\mathrm{d}V, \qquad \delta Q = 0$$

Adiabatisch bedeutet nicht isotherm.

Absinken: Kompression und Erwärmung

THEORIE / DEFINITION

Aufsteigen

p ↓ V ↑ T ↓

Sättigung kann erreicht werden.

Absinken

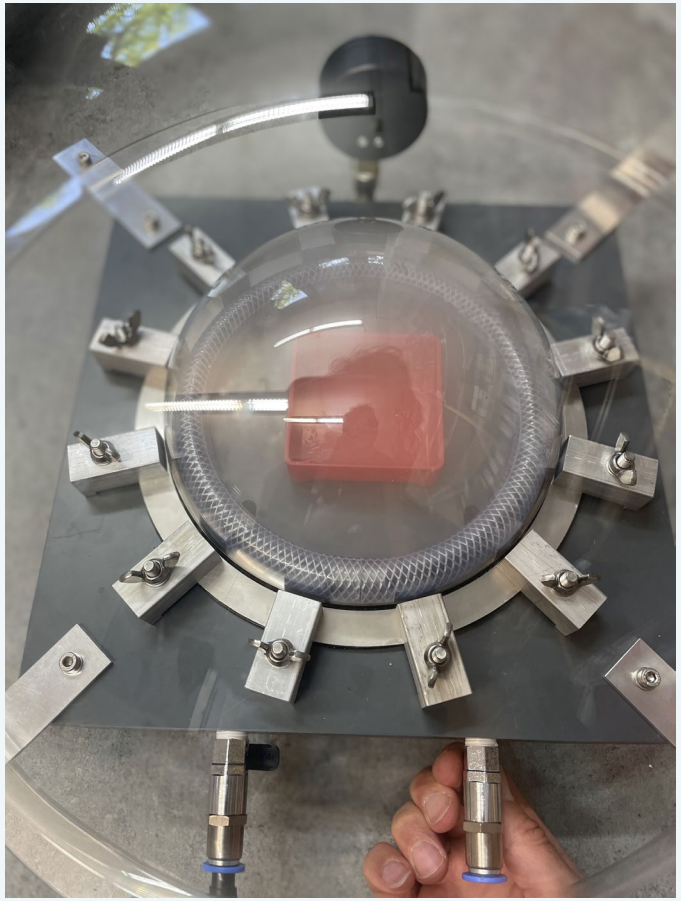
p ↑ V ↓ T ↑

Die relative Feuchte sinkt bei trockenadiabatischer Kompression.

Trockenadiabatisch: etwa 9,8 K pro km Höhenänderung.

Wolkenexperiment: Partikel und rasche Expansion

THEORIE / DEFINITION



Vorhersage vor dem Loslassen — Wie verändern sich Temperatur, Sättigung und Trübung?

Demonstration

1 · Partikelbildung aus Limonen und Ozon → SOA
2 · Rasches Entspannen der vorbereiteten Flasche
3 · Erneutes Komprimieren und Wiederholen

Nur sicherheitsgeprüfte Demonstration.

Die Beobachtung deuten – die Modellgrenzen kennen

ANTWORT / ANWENDUNG

Übertragbarer Mechanismus

Entspannen → Abkühlen → Kondensation

Komprimieren → Erwärmen → Verdunsten

Grenzen des Modells

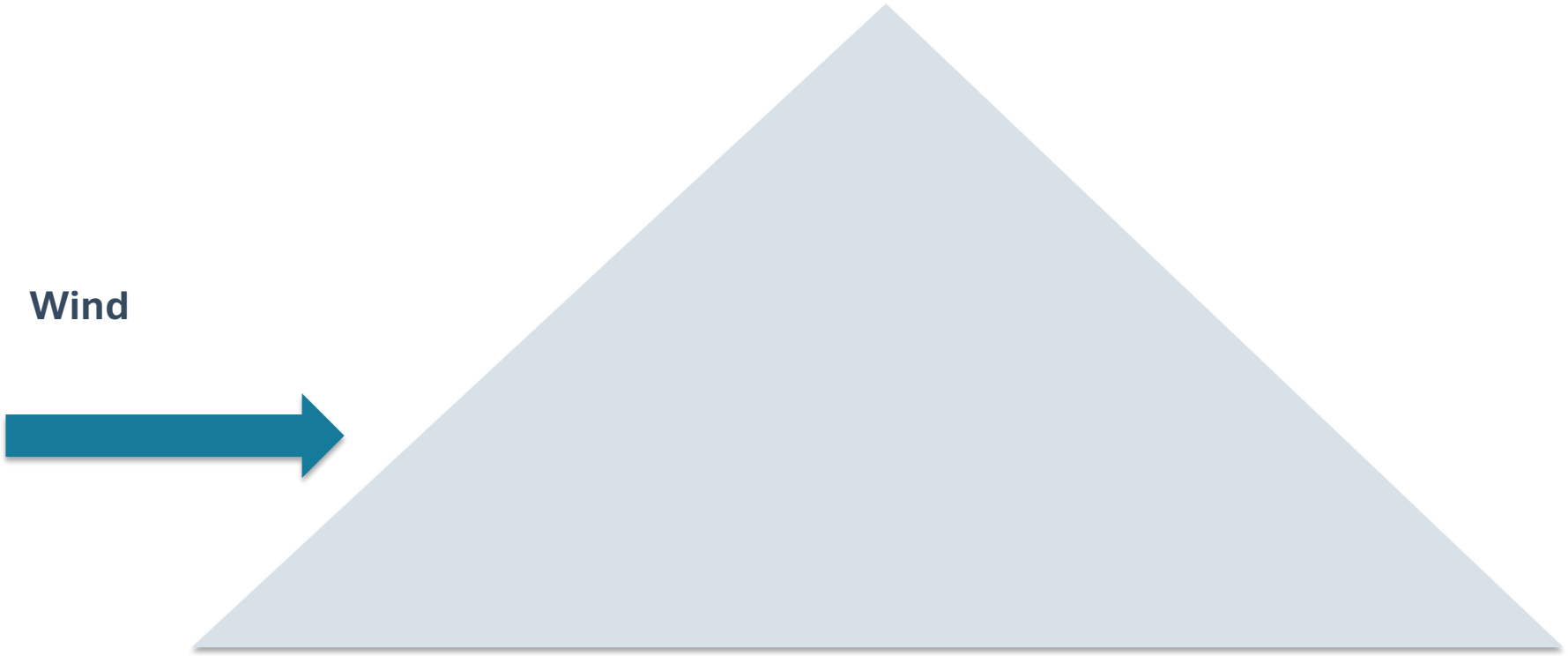
Aerosolbildung ist nicht Wolkenbildung.

Wasser-/Ethanol-System statt reiner Wasserwolke.

Druckänderung und Phasenwechsel verbinden Flasche und Atmosphäre.

Wo erwartet ihr feuchte Luft und Wolken, wo trockenere Luft?

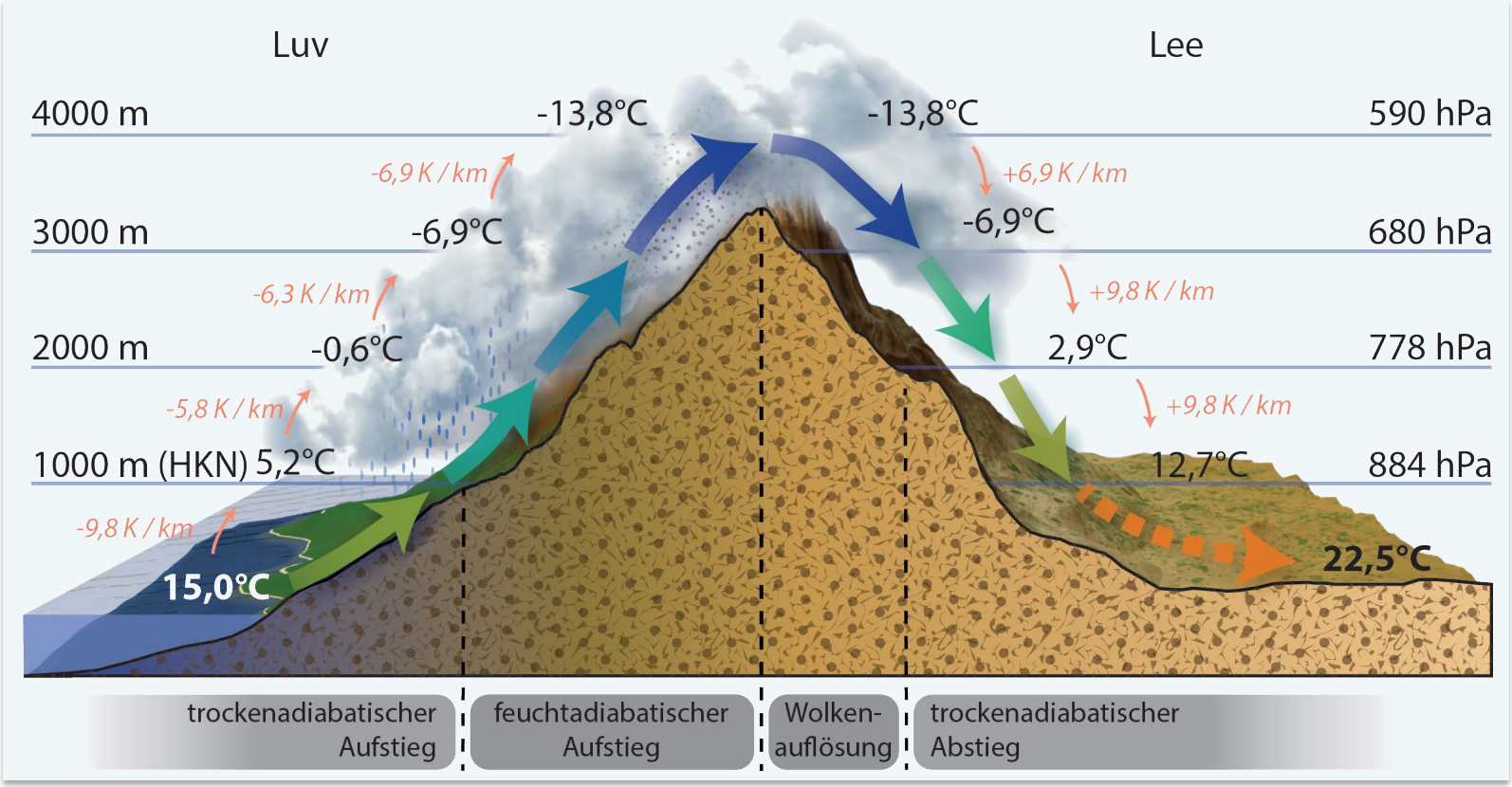
FRAGE / DISKUSSION



Begründet eure Vorhersage mit Druck, Temperatur und Sättigung.

Orographische Hebung und Föhn: das idealisierte Modell

ANTWORT / ANWENDUNG

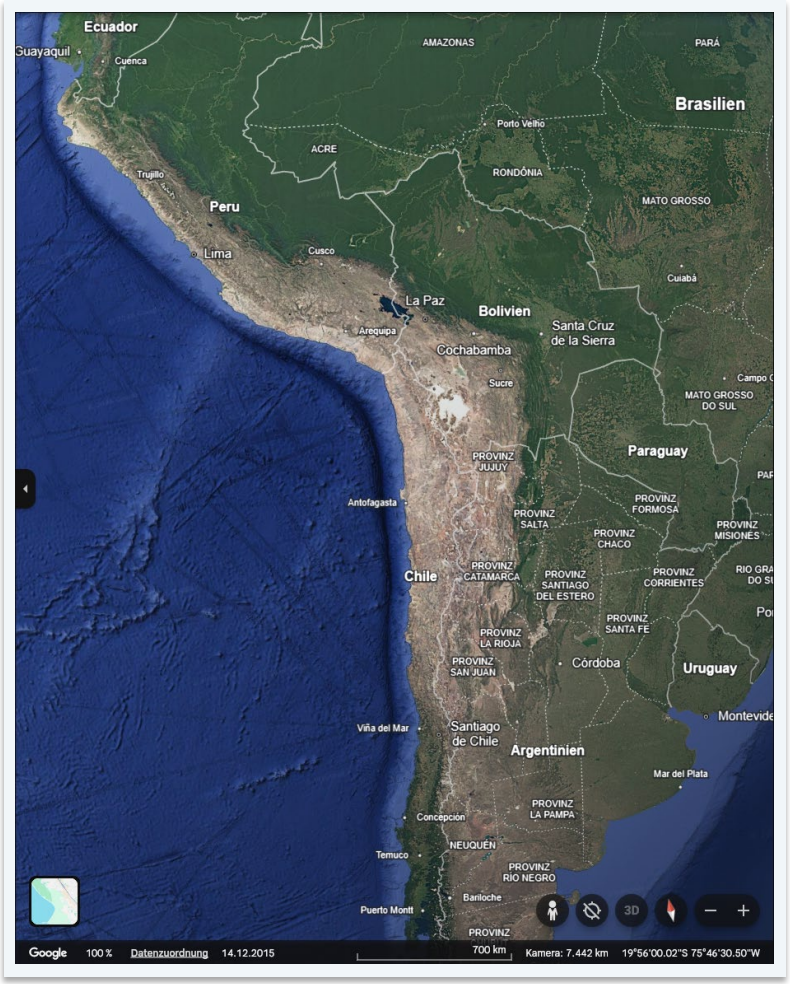


Warum nicht symmetrisch? — Kondensation setzt Wärme frei; Ausregnen entzieht Wasser. Beim anschließenden Absinken erwärmt sich die entfeuchtete Luft.

Krebsbach und Koppmann, 202x

Atacama und Anden: Vegetation als Hinweis auf Anströmung

THEORIE / DEFINITION



Beobachtungsfrage

Welche Gebirgsseite ist wo grüner?

Einordnung

Norden: östliche Feuchtezufuhr.
Süden: Westwindzone.

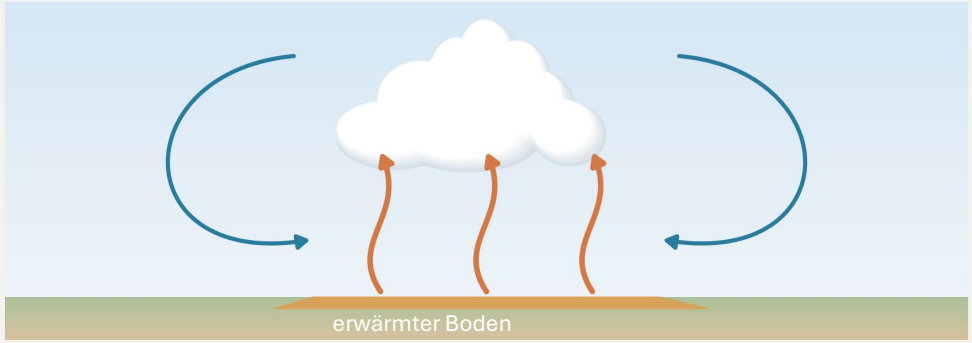
Atacama: auch Absinken und Humboldtstrom.

Google Earth

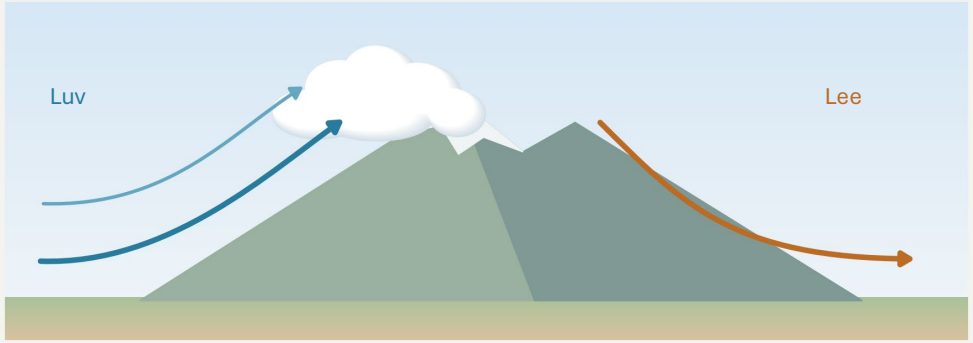
Vier Mechanismen bringen Luft zum Aufsteigen

GRUNDLAGEN · VIER IDEALISIERTE HEBUNGSMECHANISMEN

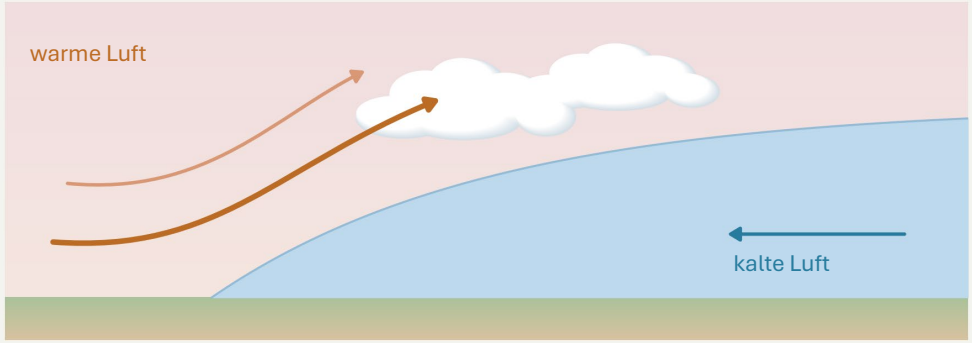
1 Konvektive Hebung



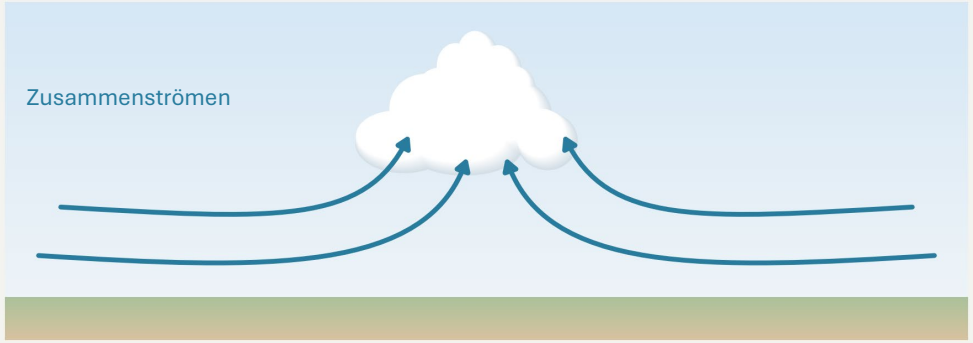
2 Orographische Hebung



3 Frontale Hebung



4 Konvergente Hebung

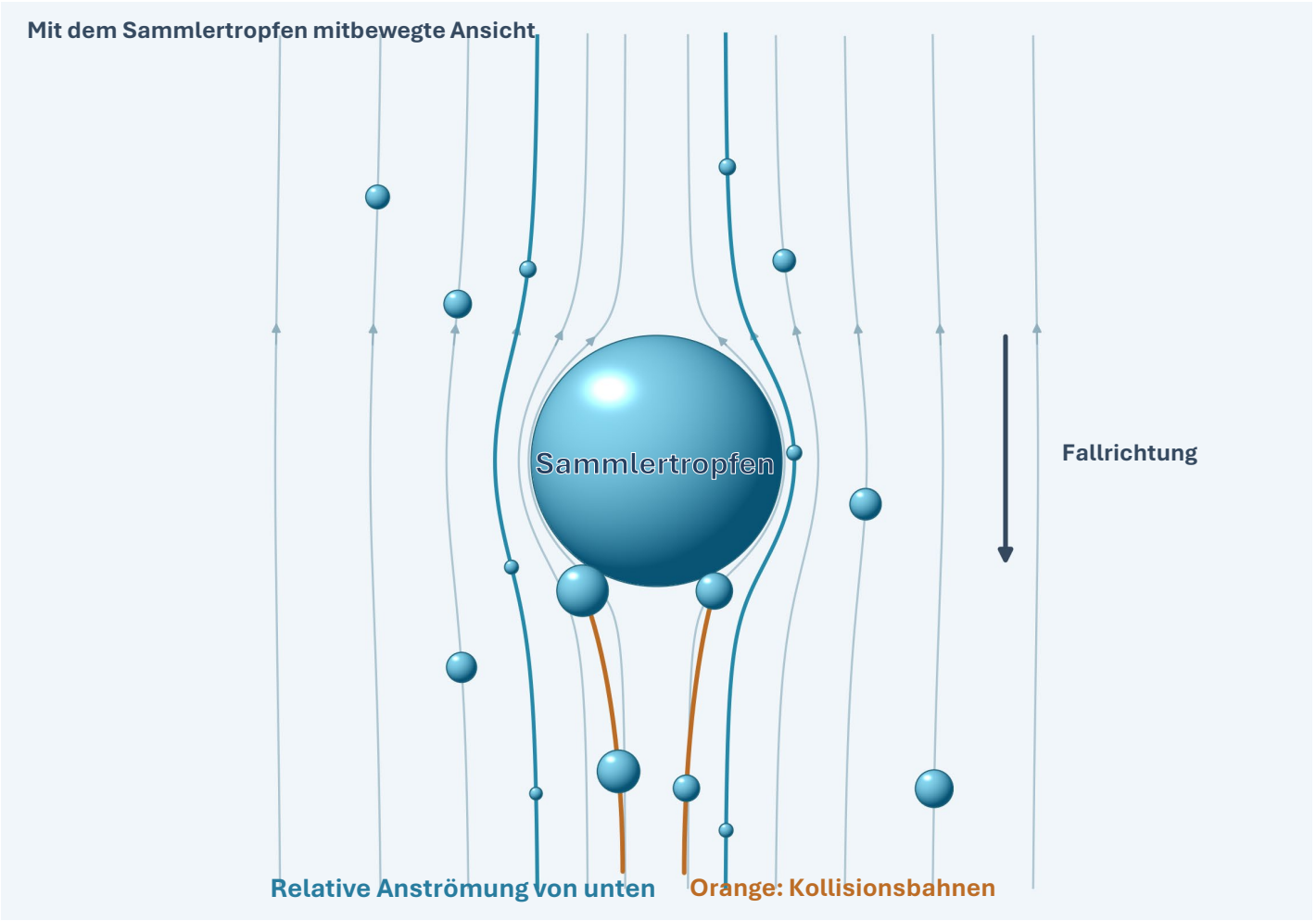


Aufsteigende Luft expandiert und kühlt ab.

Eigene Illustrationen · Wolken symbolisch; Hebung allein garantiert weder Wolken noch Niederschlag.

Kollision und Koaleszenz: Wachstum zu Regentropfen (ohne Eisphase)

SAMMLERTROPFEN · UNTERSCHIEDLICHE GRÖSSEN, UNTERSCHIEDLICHE BAHNEN



Vorbeifliegen

Kleine Tröpfchen folgen der ausweichenden Luft.

Auch größere können seitlich vorbeiziehen.

Kollidieren

Passende Bahn und genügend Trägheit ermöglichen einen Treffer → Verschmelzen der Tropfen

Sammlertropfen können weiter wachsen.

Windschutzscheiben-Analogie:

Die Luft weicht aus – sehr kleine Teilchen folgen ihr.

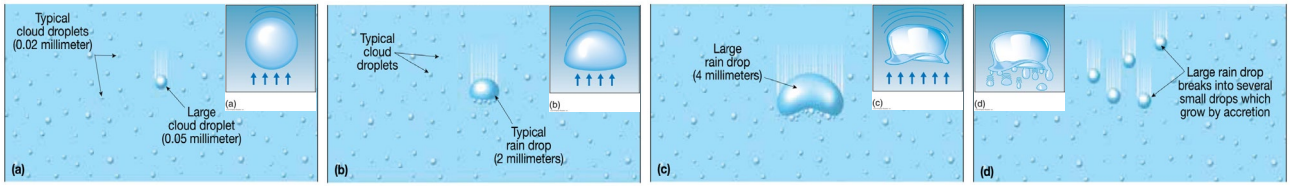
Nicht alle Tröpfchen in der Fallbahn werden eingefangen – die Luft kann sie seitlich ablenken.

Eigene Modellskizze · Umströmung und Bahnen idealisiert; Größen nicht maßstäblich. Kollision ist nicht gleich Koaleszenz.

Film: Wie werden aus Wolkentropfen Regentropfen?

THEORIE / DEFINITION

https://www.zdf.de/sender/zdfinfo/wild-weather-die-macht-von-wind-wasser-und-extrem-100.html



© Pearson Education, Inc.

Beobachtungsauftrag

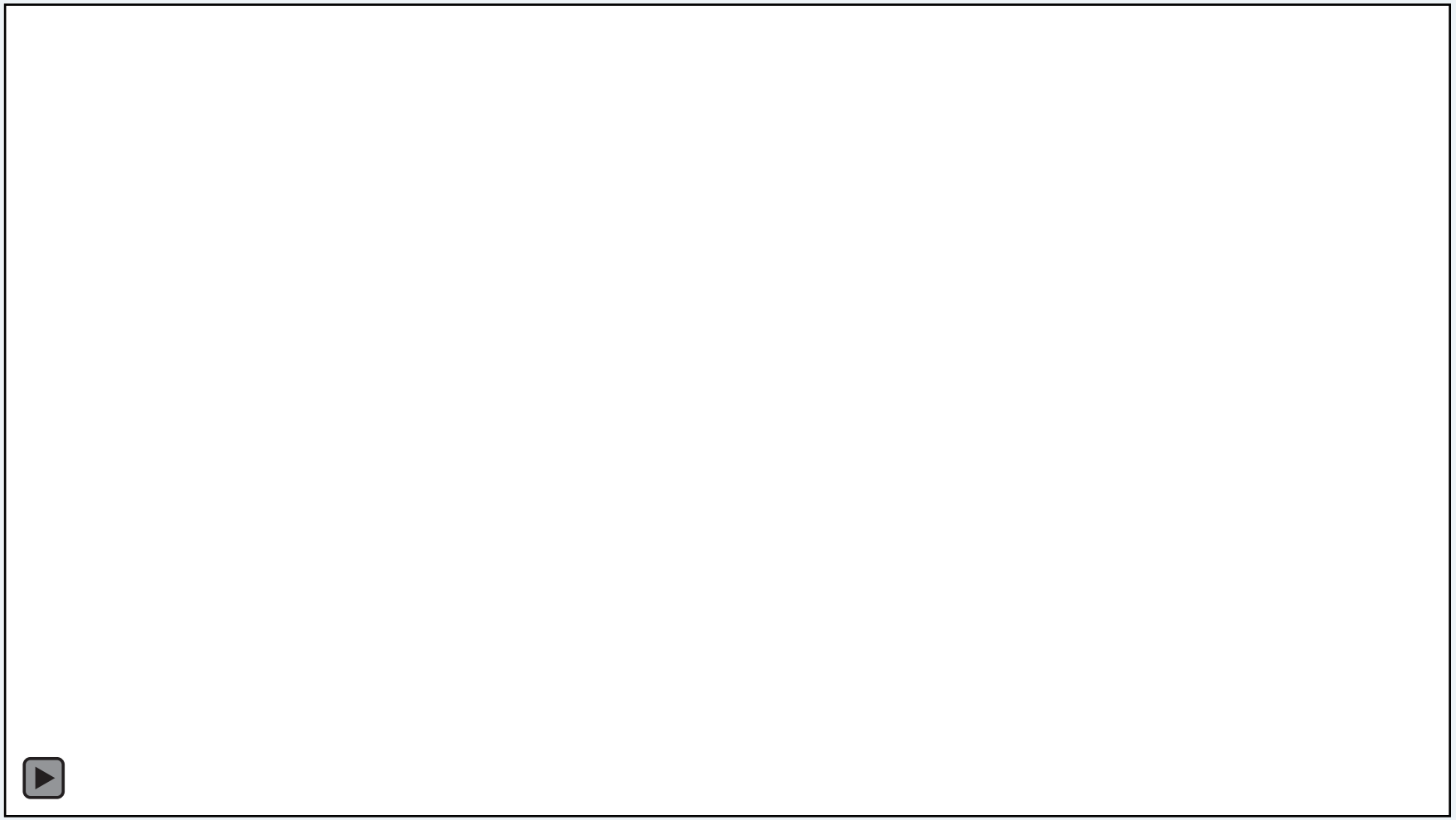
Wie kommt es dazu, dass Tropfen zusammenstoßen?

Was passiert, wenn zwei Tropfen zusammentreffen?

Was kann das Wachstum begrenzen?

Starkregen: hohe Rate, viel Nachschub und lange Dauer

THEORIE / DEFINITION



https://www1.wdr.de/mediathek/video/sendungen/quarks-und-co/video-starkregen-sturzflut-sintflut--sieht-so-der-sommer-der-zukunft-aus-100.html

Starkregen: hohe Rate, viel Nachschub und lange Dauer

THEORIE / DEFINITION

Wasserangebot

Feuchte Luft

Fortgesetzter Feuchtenachschub und Hebung

Effizienz

Wachsende Teilchen erreichen den Boden.

Verdunstung kann Verluste verursachen.

Örtliche Regenmenge

Hohe Rate × lange Dauer

Langsame oder wiederholt nachfolgende Zellen

Teilchenwachstum, Dynamik und Feuchtenachschub wirken zusammen.

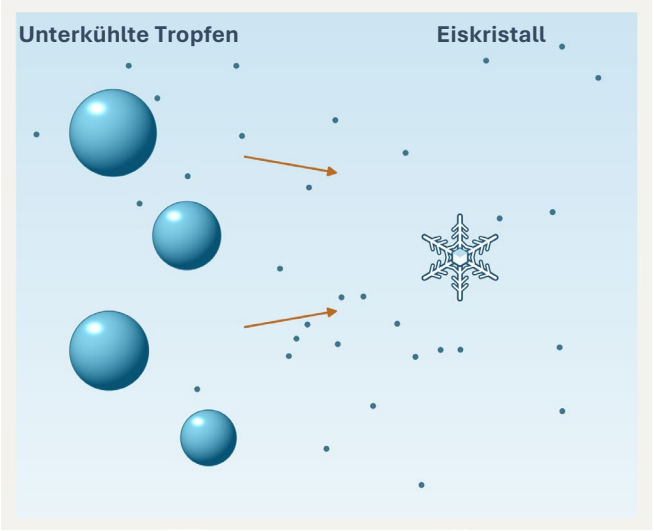
Wegener-Bergeron-Findeisen: Eis wächst auf Kosten unterkühlter Tropfen

MISCHPHASENWOLKE · TRANSPORT ÜBER DIE GASPHASE

$$e_{s,i}(T) < e < e_{s,w}(T)$$

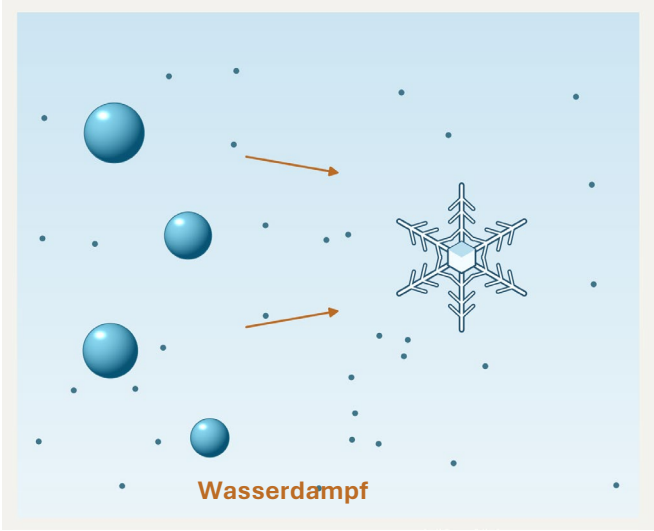
Bei gleicher Temperatur unter 0 °C:
untersättigt über Wasser, übersättigt über Eis.

1 Tropfen und Eis



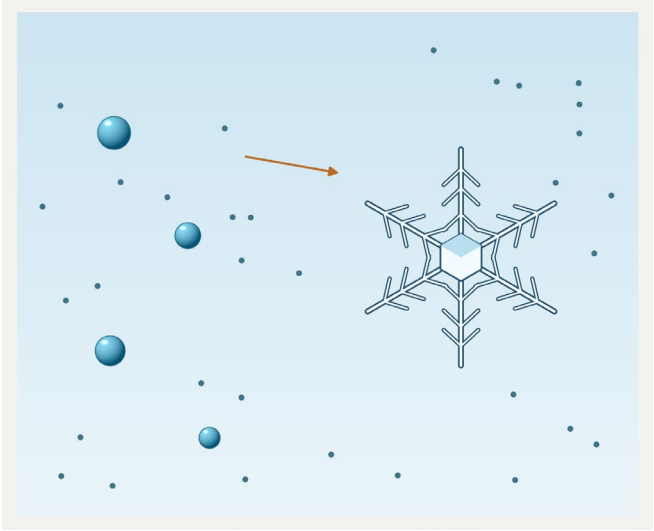
Wasserdampf, flüssiges Wasser und Eiskristalle existieren nebeneinander.

2 Dampftransport



Tropfen verdunsten netto → Nachlieferung
Wasserdampf → lagert sich am Eis an.

3 Eis wächst weiter



Tropfen werden kleiner,
Eis wächst auf Kosten der Flüssigphase.

Flüssig → gasförmig → fest: Wachstum ohne direkten Kontakt zwischen Tropfen und Eis.

Weiteres Wachstum und anschließendes Schmelzen können Regen am Boden ergeben.

Eigene Schemata · Größen und Zeitabstände nicht maßstäblich; Punkte: Wasserdampf symbolisch.

Hagel: Flüssigwasser, Eis und starke Aufwinde

THEORIE / DEFINITION

Wie Hagel wächst

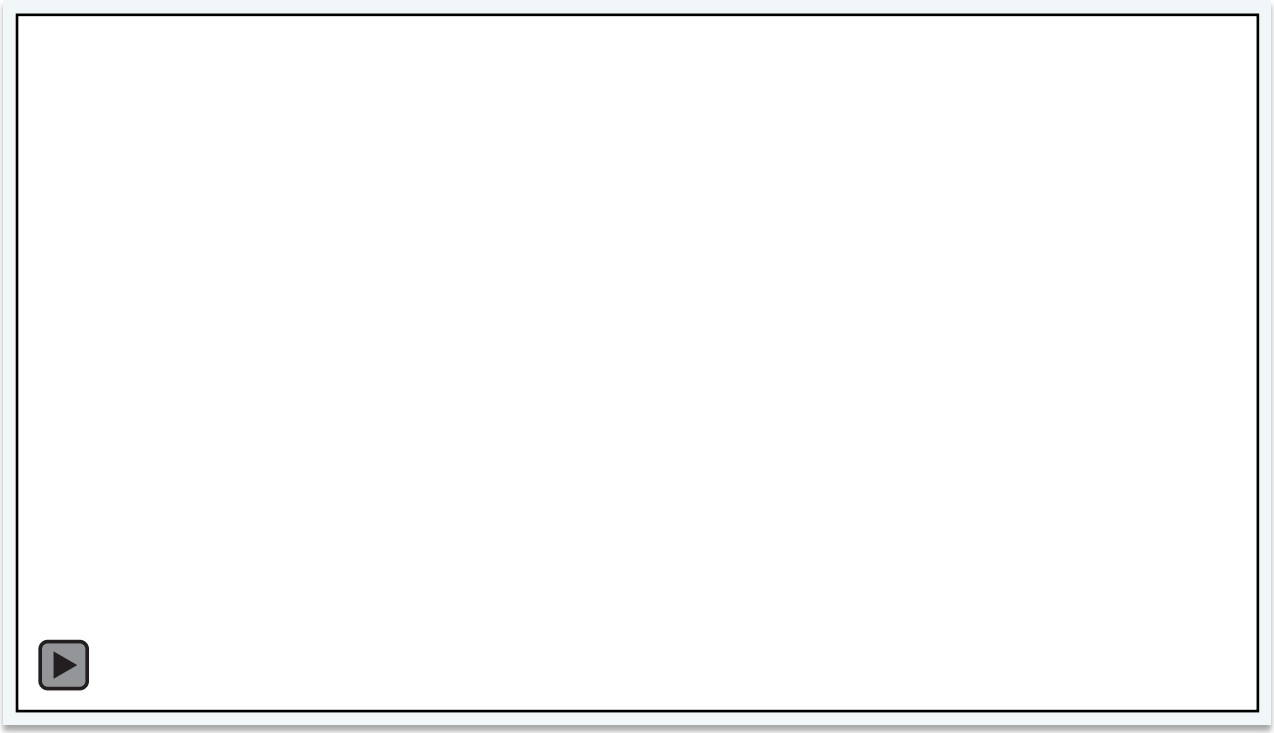
Unterkühlte Tropfen frieren an Eiskeimen an.

Aufwinde ermöglichen lange Wachstumszeiten.

Schichten entstehen durch unterschiedliche Wachstumsbedingungen – nicht zwingend durch „Aufzugfahrten“.

Was schützt vor Schäden?

Mechanischer Schutz, z. B. Netze oder Überdachungen.
Hagelimpfung und Hagelkanonen sind kein allgemein gesichert wirksamer Schutz.



https://www.zdf.de/sender/zdfinfo/wild-weather-die-macht-von-wind-wasser-und-extrem-100.html

Drei Zusammenhänge für die Anwendung

THEORIE / DEFINITION

Energie — Gefrieren, Schmelzen, Verdunsten und Kondensieren verändern Energiebilanzen.

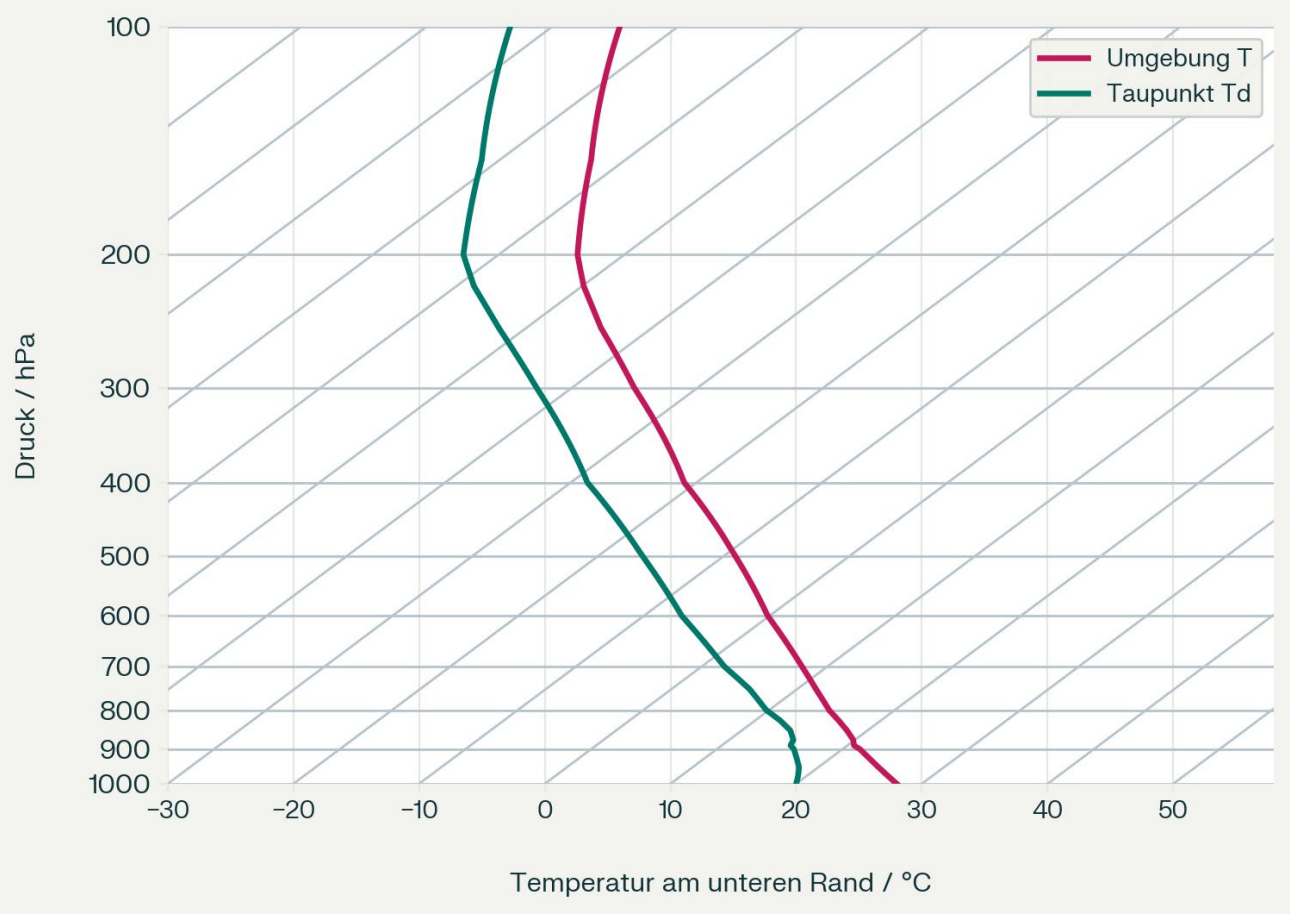
Gleichgewicht — Dampfdruckgefälle bestimmen die Richtung von Phasenänderungen.

Atmosphäre — Hebung kann Wolken erzeugen; Wachstum und Dynamik entscheiden über Niederschlag.

OPTION: Wetterballon analysieren →

Unser Lehrprofil: eine Hemmschicht und darüber Instabilität

THEORIE / DEFINITION



Erklärung

Synthetisches Lehrprofil.

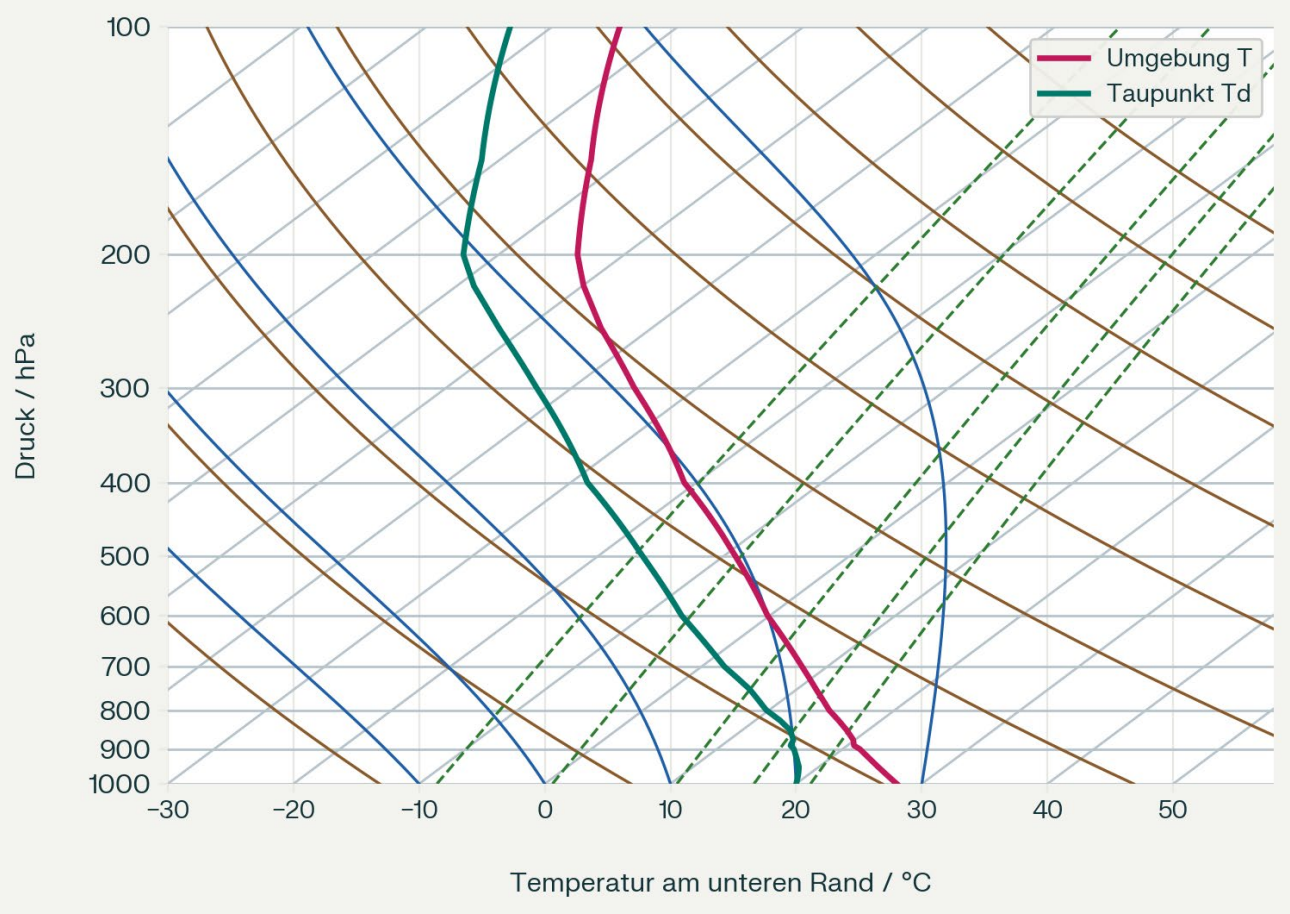
Bodenpaket:
1000 hPa · T = 28 °C
Td = 20 °C

Feuchte, Hemmung und Instabilität sind gezielt kombiniert.

Synthetisches Lehrprofil – keine Radiosondenmessung.

Skew-T–ln(p): die benötigten Linien

THEORIE / DEFINITION



Erklärung

Rot: Umgebung T

Blau: Taupunkt Td

Hilfslinien:

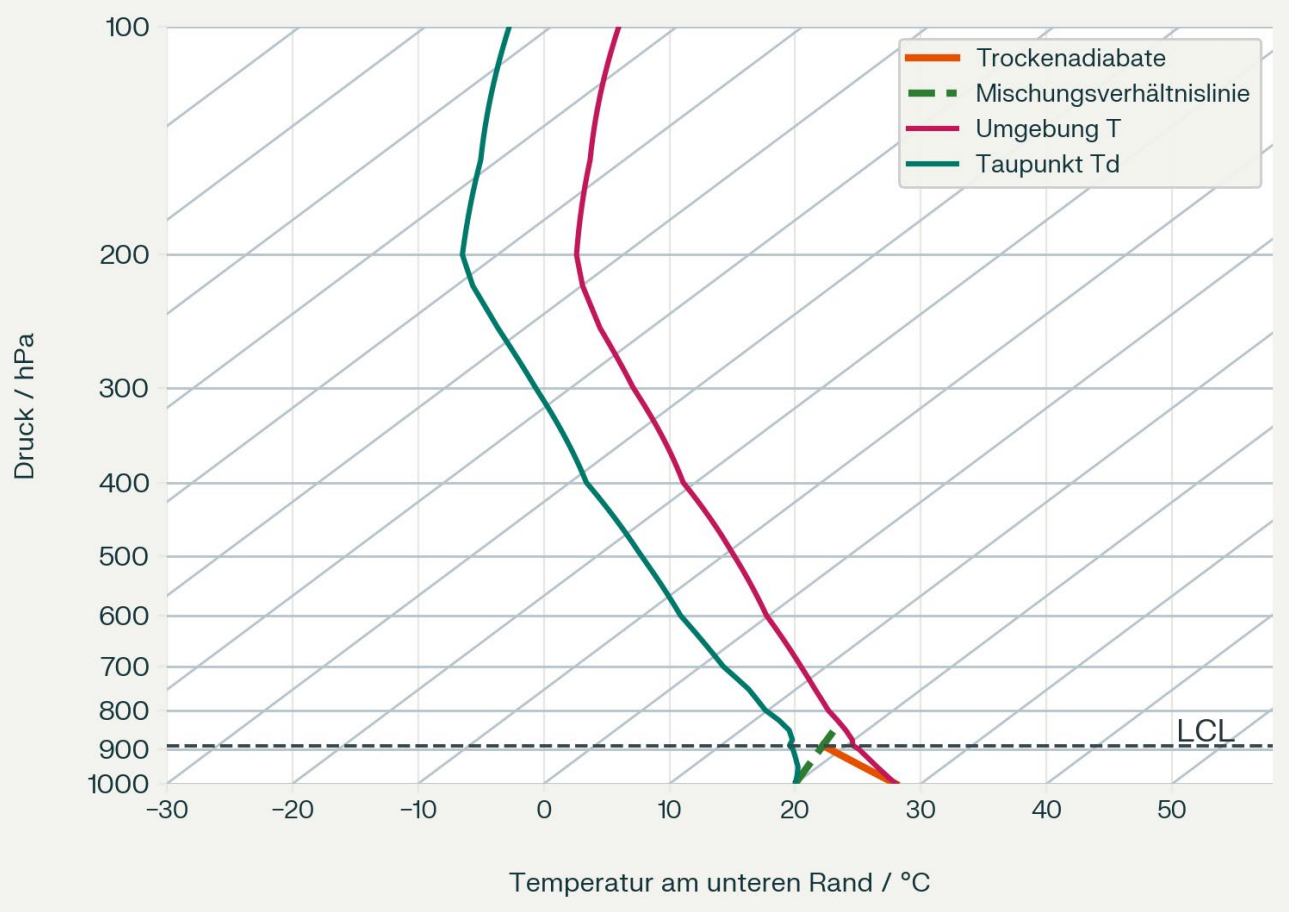
- Trockenadiabaten
- Feuchtadiabaten
- Sättigungs-Mischungsverhältnis

Nach oben: geringerer Druck.

Isothermen, Trocken- und Feuchtadiabaten sowie Mischungsverhältnislinien.

LCL: Wo erreicht das gehobene Paket Sättigung?

FRAGE / DISKUSSION



Frage

Ab dem Boden:

1 · Trockenadiabate ab 28 °C

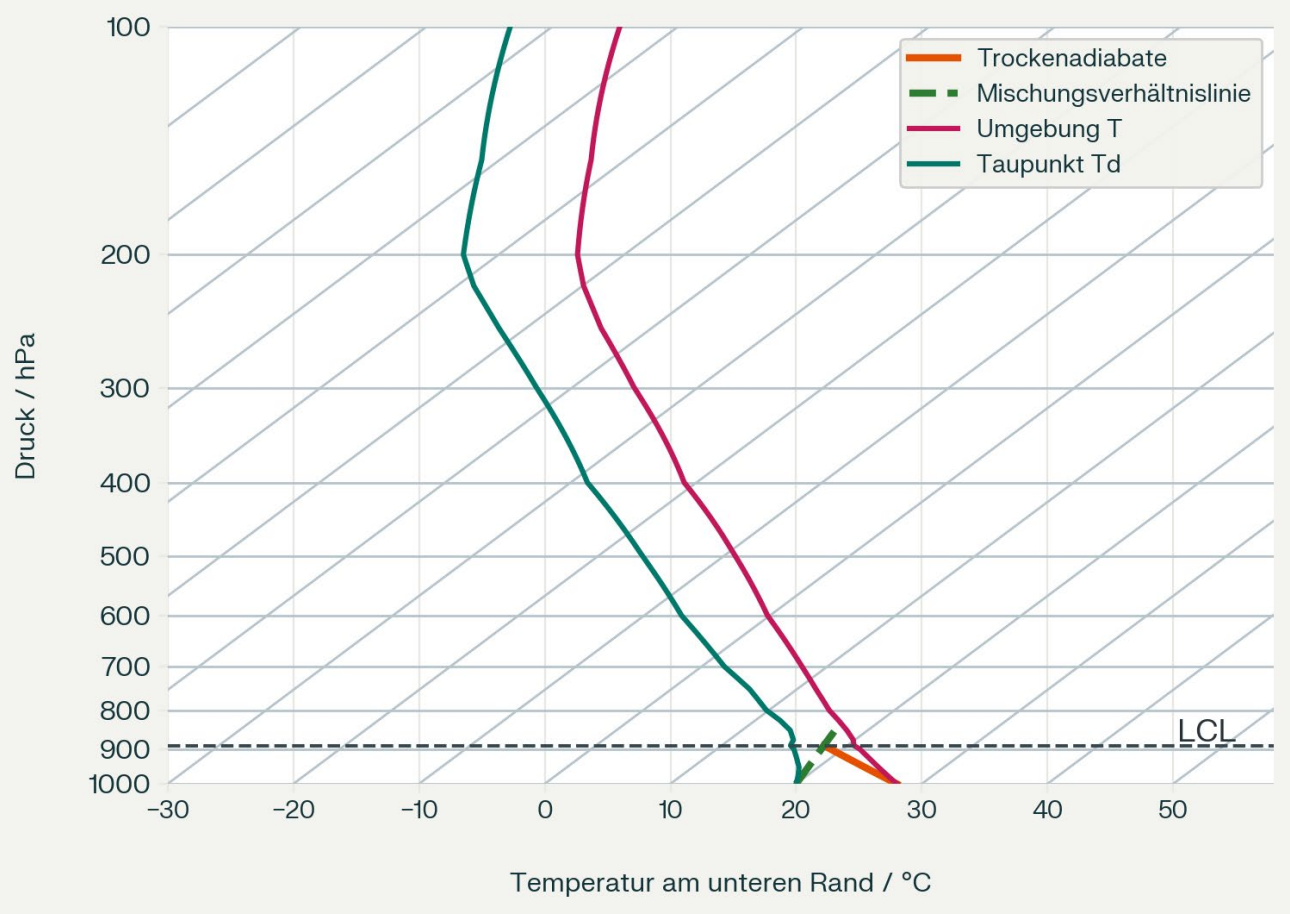
2 · Mischungsverhältnislinie ab Td = 20 °C

3 · Schnittpunkt markieren.

Trockenadiabate und Mischungsverhältnislinie schneiden sich im LCL.

LCL ≈ 890 hPa: Sättigung ist noch kein freier Auftrieb

ANTWORT / ANWENDUNG



Ergebnis

LCL ≈ 890 hPa

Das gehobene Paket erreicht Sättigung.

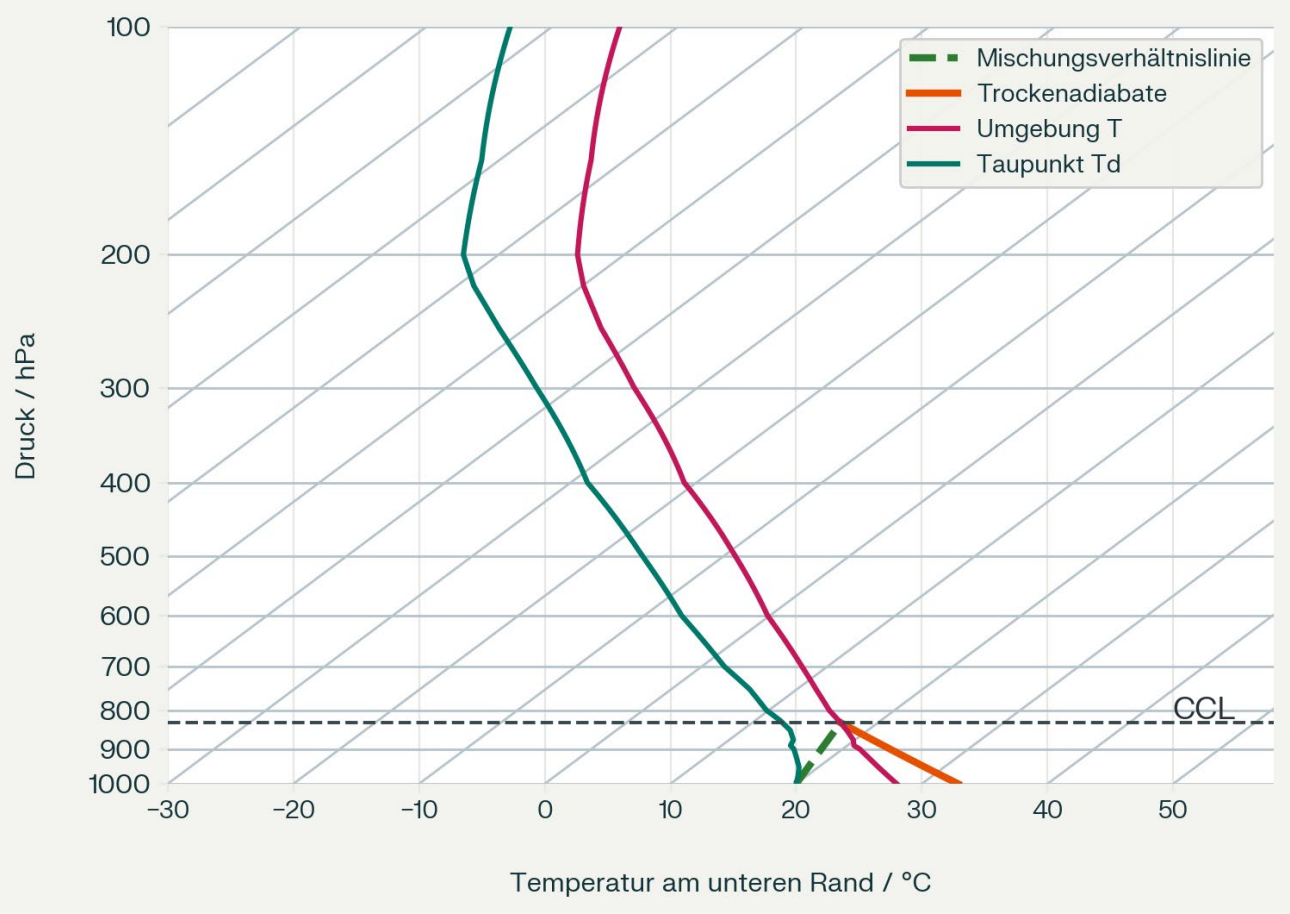
Die Umgebung kann trotzdem noch wärmer bzw. weniger dicht sein.

LCL ≠ LFC.

Sättigung bedeutet nicht automatisch positiven Auftrieb.

CCL und Auslösetemperatur bestimmen

FRAGE / DISKUSSION



Frage

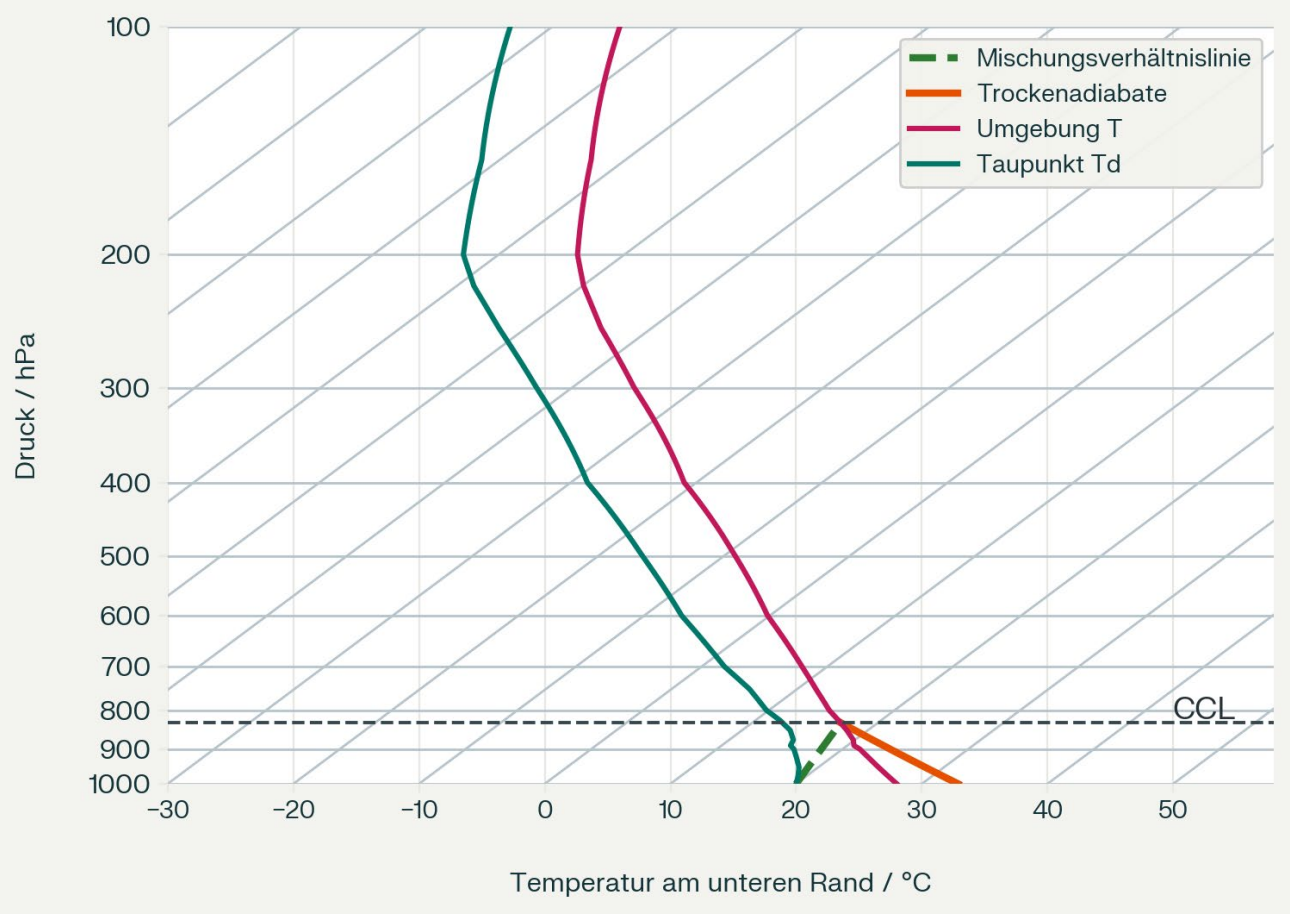
1 · Mischungsverhältnislinie bis zur Umgebungskurve → CCL

2 · Von dort **trockenadiabatisch** zum Boden → Auslösetemperatur

CCL bestimmt das Kondensationsniveau; die Auslösetemperatur folgt daraus.

CCL ≈ 831 hPa und Auslösetemperatur ≈ 33 °C

ANTWORT / ANWENDUNG



Ergebnis

CCL ≈ 831 hPa

Auslösetemperatur ≈ 33 °C

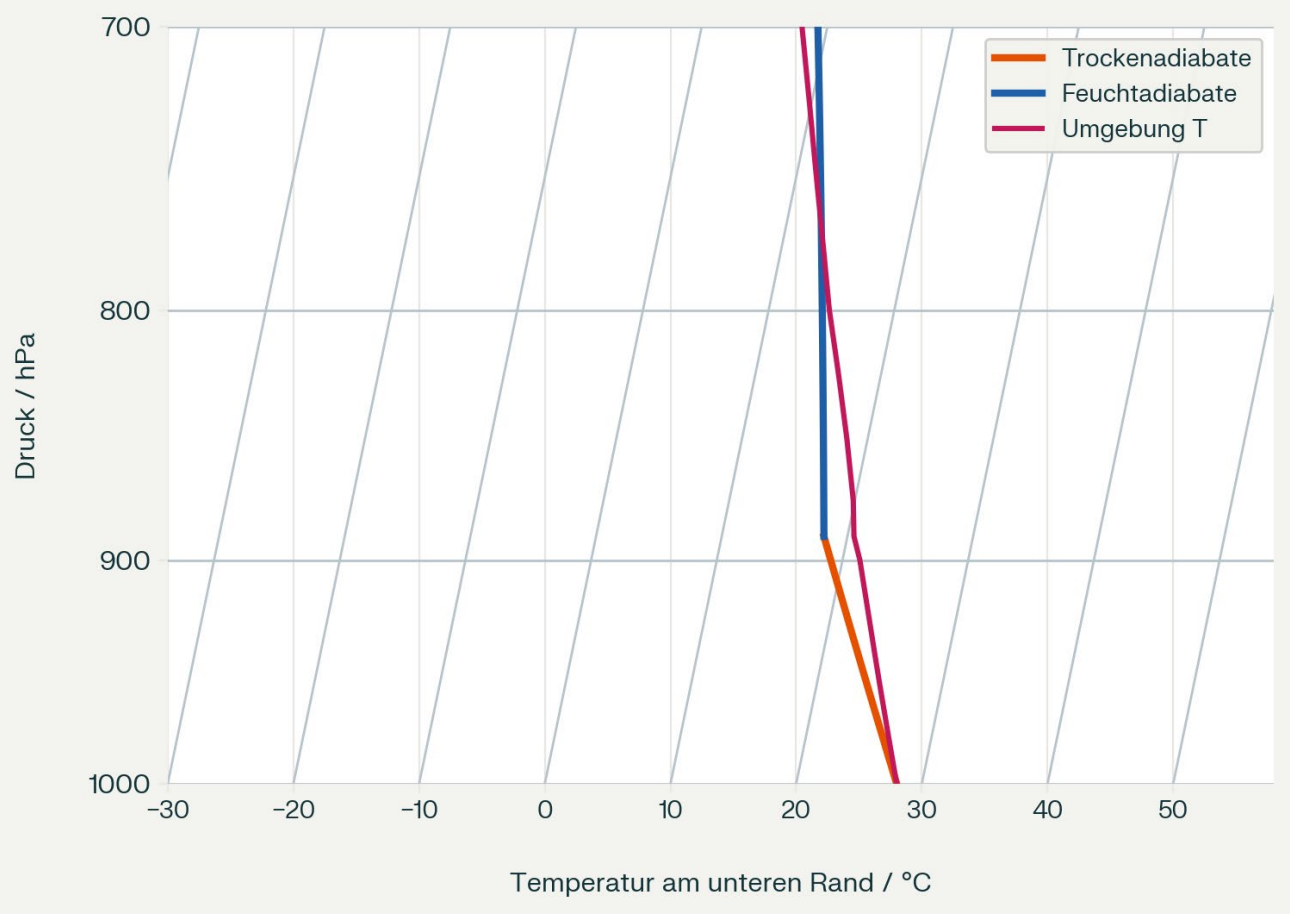
Unter der Annahme unveränderter Ausgangsfeuchte.

Keine vollständige Gewittergarantie.

Unter der Annahme unveränderter Ausgangsfeuchte.

Der Paketweg oberhalb des LCL

THEORIE / DEFINITION



Erklärung

Orange: ursprüngliches Paket

Unterhalb LCL: trockenadiabatisch

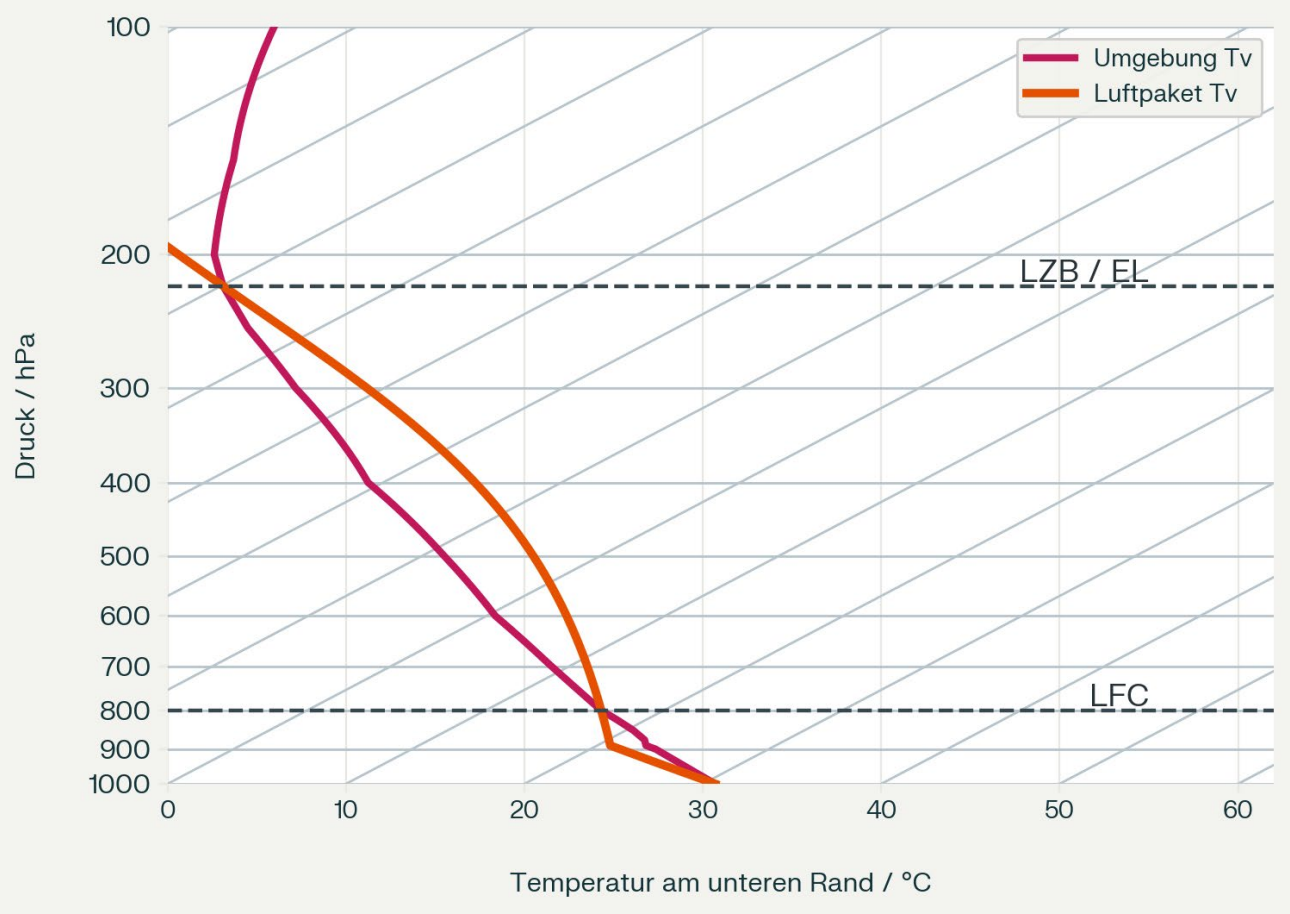
Oberhalb LCL: gesättigter Paketaufstieg

Jetzt mit der Umgebung vergleichen.

Oberhalb des LCL folgt der gesättigte Paketaufstieg.

LFC und LZB: Wo beginnt und endet positiver Auftrieb?

ANTWORT / ANWENDUNG



Ergebnis

Jetzt: virtuelle Temperaturen T_v

LFC = 800 hPa

Positiver Auftrieb beginnt.

LZB / EL = 220 hPa

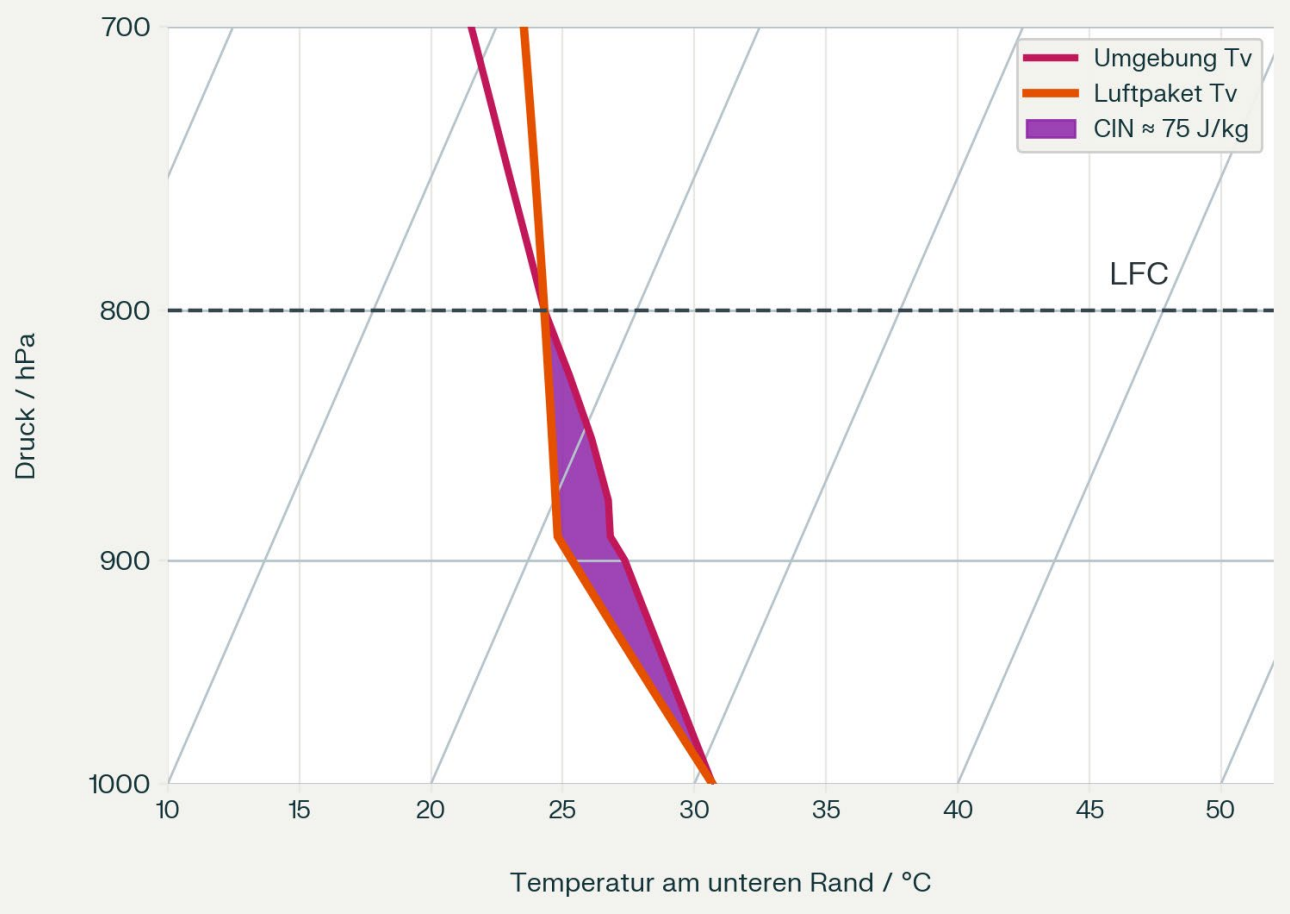
Auftrieb wird oben wieder null.

Überschießen ist möglich.

Freier Auftrieb beginnt am LFC und endet am LZB/EL.

CIN: die Energiebarriere unterhalb des LFC

ANTWORT / ANWENDUNG



Ergebnis

CIN ≈ 75 J/kg

Zunächst ist das Paket dichter als die Umgebung.

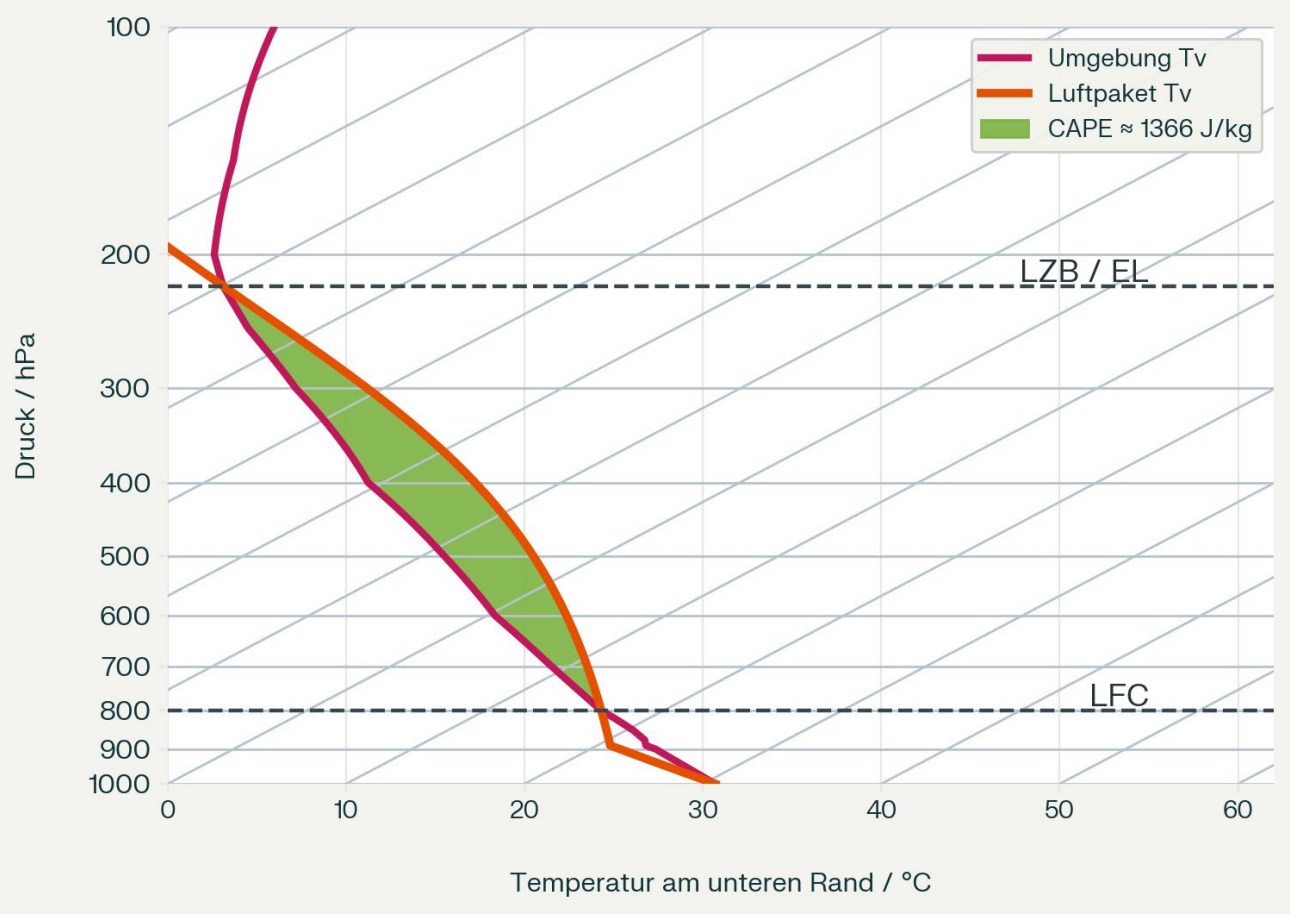
Für den Weg zum LFC muss diese Hemmung überwunden werden.

Detail der unteren Troposphäre.

CIN beschreibt die Hemmung unterhalb des LFC.

CAPE: verfügbare positive Auftriebsarbeit

ANTWORT / ANWENDUNG



Ergebnis

CAPE ≈ 1370 J/kg

Positive Auftriebsarbeit zwischen LFC und LZB/EL.

Energie pro Masse – nicht Temperatur.

CAPE allein ist keine Unwetterprognose.

CAPE beschreibt die positive Auftriebsarbeit zwischen LFC und LZB/EL.

Was folgt daraus – und was noch nicht?

OPTION · FRAGE / DISKUSSION

Entscheidet und begründet

Das Profil enthält CAPE, aber auch CIN.

Genügt das als Beleg für ein Gewitter?
Welche weiteren Informationen braucht man für Starkregen oder großen Hagel?

Grenze der Diagnose — Paketmodell, Auslösung, Feuchtenachschub, Wind und Teilchenwachstum müssen zusammen betrachtet werden.

Zurück zum Titelbild: Ein Loch in der Wolkendecke

FRAGE / DISKUSSION



Erklärung

Lokale Abkühlung an Flügeln oder Propellern lässt unterkühlte Tröpfchen gefrieren – ohne zusätzliche Eiskeime.

Verstärkung: Tropfen verdunsten, Eis wächst über die Gasphase (Wegener–Bergeron–Findeisen).

Ergebnis: Eiskristalle fallen aus, die Wolke löst sich örtlich auf – ein Loch entsteht.

NASA: Formation and Spread of Aircraft-Induced Holes in Clouds