

Wintersemester 2023/2024

Physische Geographie 1

(Grundkursvorlesung PG 1 – Vorlesungsteil Klimatologie)

Prof. Dr. Christoph Beck

Lehrstuhl für Physische Geographie mit Schwerpunkt Klimaforschung

Institut für Geographie

Universität Augsburg

Lufttemperatur

⇒ Maß für den **Wärmezustand** der Luft

⇐ Definiert über die
mittlere **molekulare Bewegungsenergie** eines Luftquantums

Maßeinheit der Temperatur:

- **Kelvin (K)** – orientiert am absoluten Nullpunkt (-273.15°C , entspr. molekularkinetische Bewegung $v = 0$)

- **Grad Celsius ($^{\circ}\text{C}$)** – orientiert an Gefrier- und Siedepunkt des Wassers (0° bzw. 100°C)

$$\text{K} = ^{\circ}\text{C} + 273 \text{ bzw. } ^{\circ}\text{C} = \text{K} - 273$$

Daneben: **Fahrenheit-Skala, Reaumur-Skala**

Lufttemperatur

Messung der Lufttemperatur

Meßinstrumente:

- Quecksilberthermometer
- Bimetallthermometer
- Elektrische Widerstandsthermometer



Lufttemperatur

Messung der Lufttemperatur

Meßvoraussetzungen:

- außerhalb der bodennahen Luftschicht (2m über Grund)
- Strahlungsschutz
- Ventilation

⇒ Englische Wetterhütte

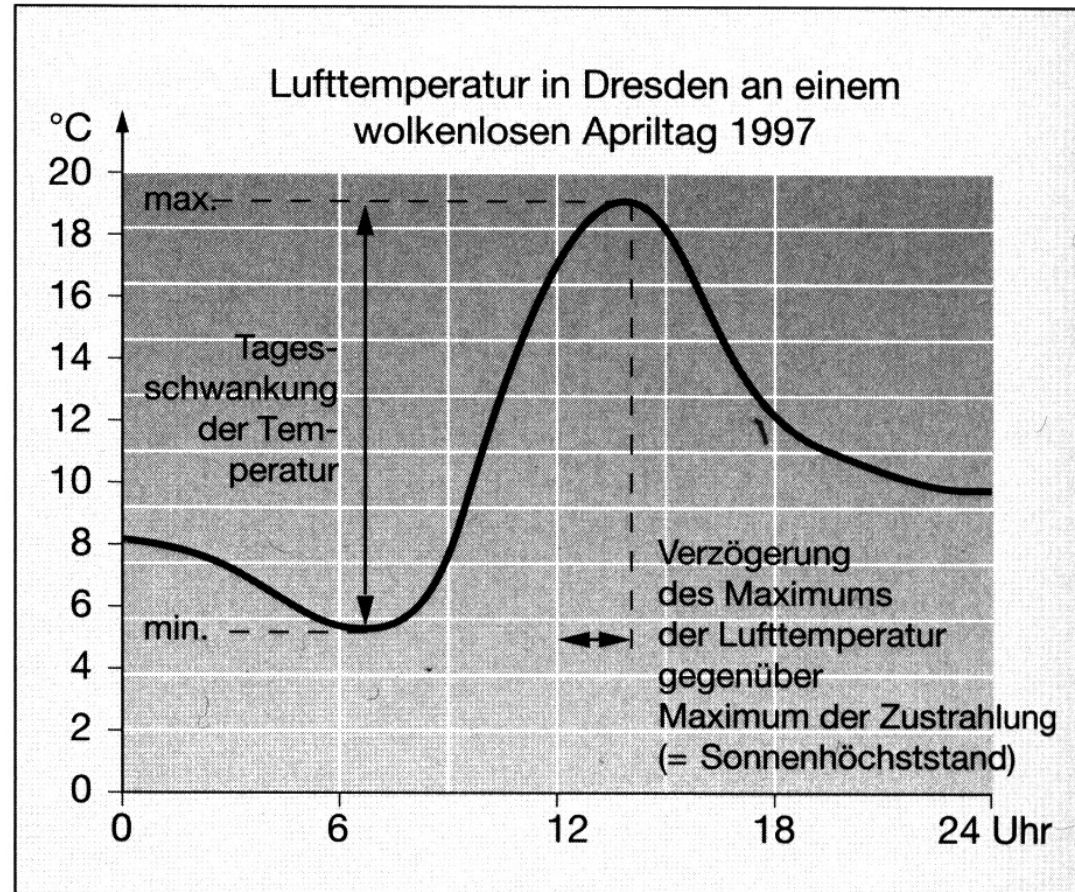


(www.zamg.ac.at)



Lufttemperatur

Tagesgang der Lufttemperatur



(Bauer 2002)

Tagesgang abhängig von:

- Witterungssituation
- Oberflächencharakteristik

Lufttemperatur

Tagesgang der Lufttemperatur über verschiedenen Oberflächen

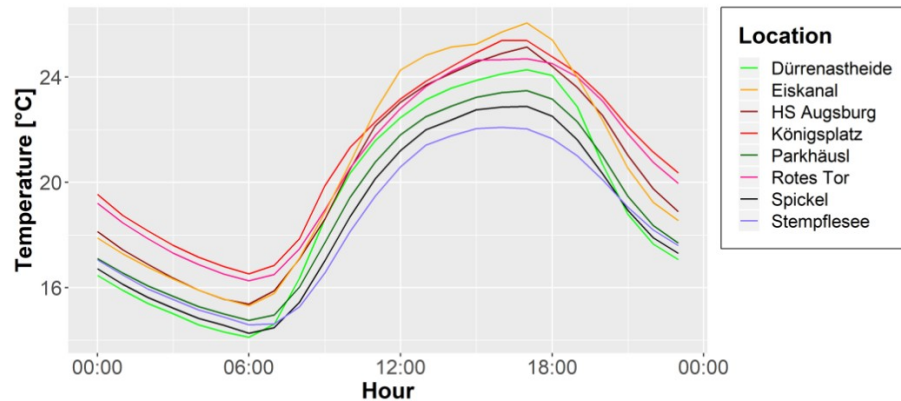


Figure 19: Diurnal cycle of air temperature at selected sites in the urban forest and city of Augsburg for the time period July 19 – August 27, 2019

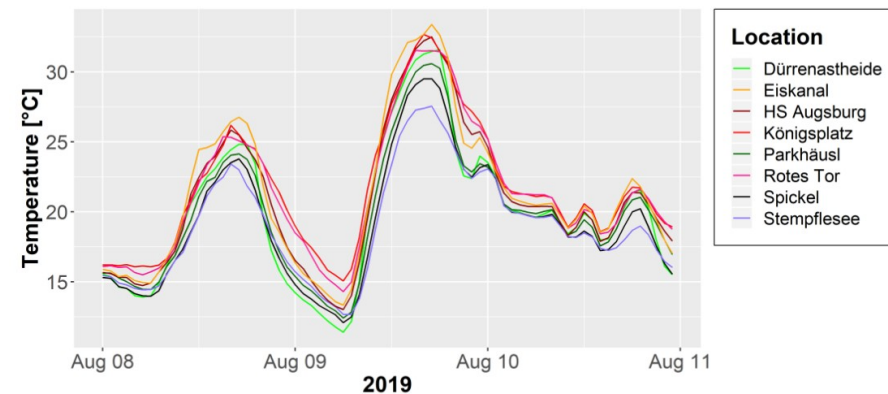


Figure 17: Heat event on August 9, 2019, at selected sites in the urban forest and city of Augsburg

(Buschlinger 2020)

Tagesgang der Lufttemperatur in 2m Höhe über verschiedenen Oberflächenarten
(am 25./26.7.1985, nach E. Hase 1990)

Lufttemperatur

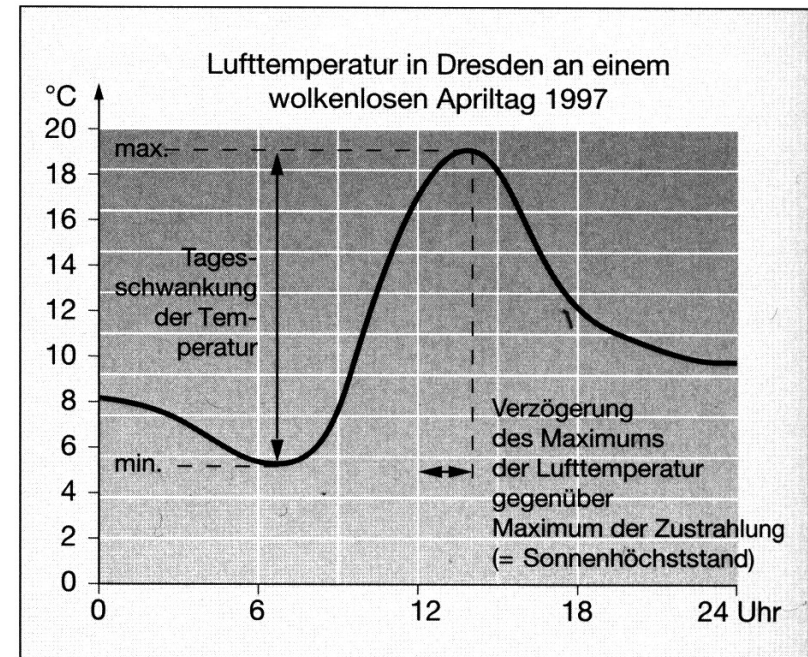
Bestimmung des Tagesmittels der Lufttemperatur

Abschätzung des Tagesmittels
aus den

„Mannheimer Stunden“



$$\bar{T} = \frac{T_{7\text{ Uhr}} + T_{14\text{ Uhr}} + 2 * T_{21\text{ Uhr}}}{4}$$

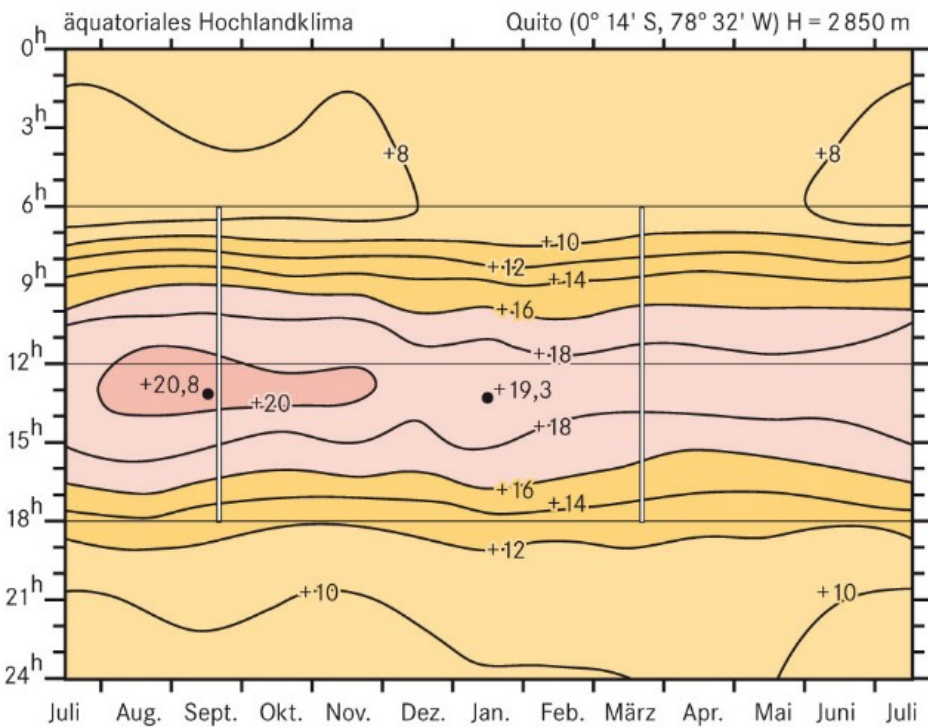


(Bauer 2002)

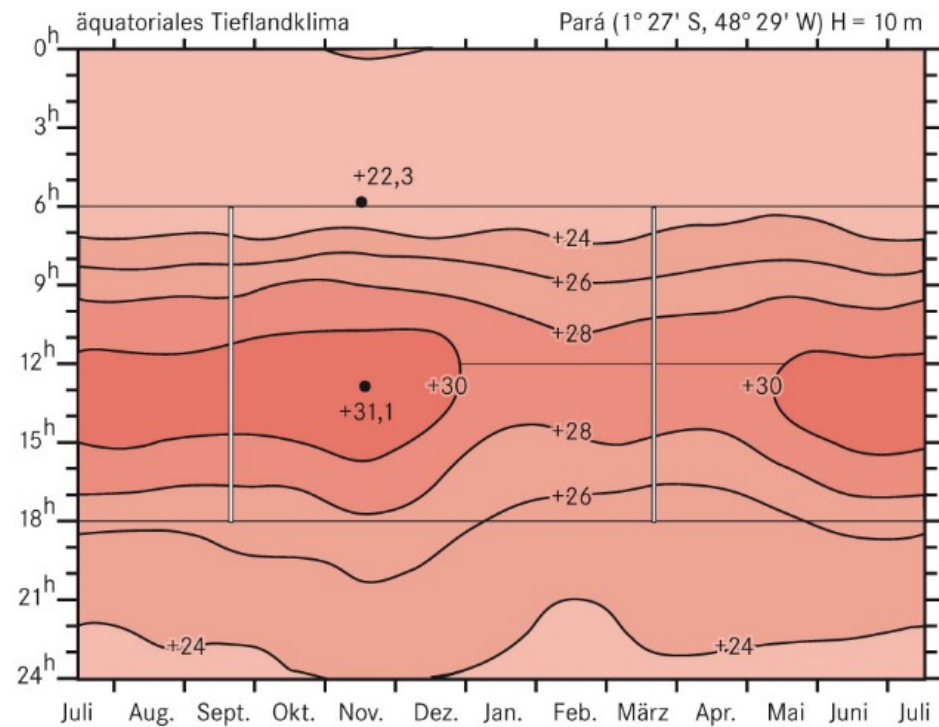
Lufttemperatur

Tages- und jahreszeitliche Variationen der Lufttemperatur in räumlicher Differenzierung

Thermisches Tageszeitenklima



Quito. Äquatoriales Hochlandklima mit fast fehlender Jahreschwankung und starker Tagesschwankung.

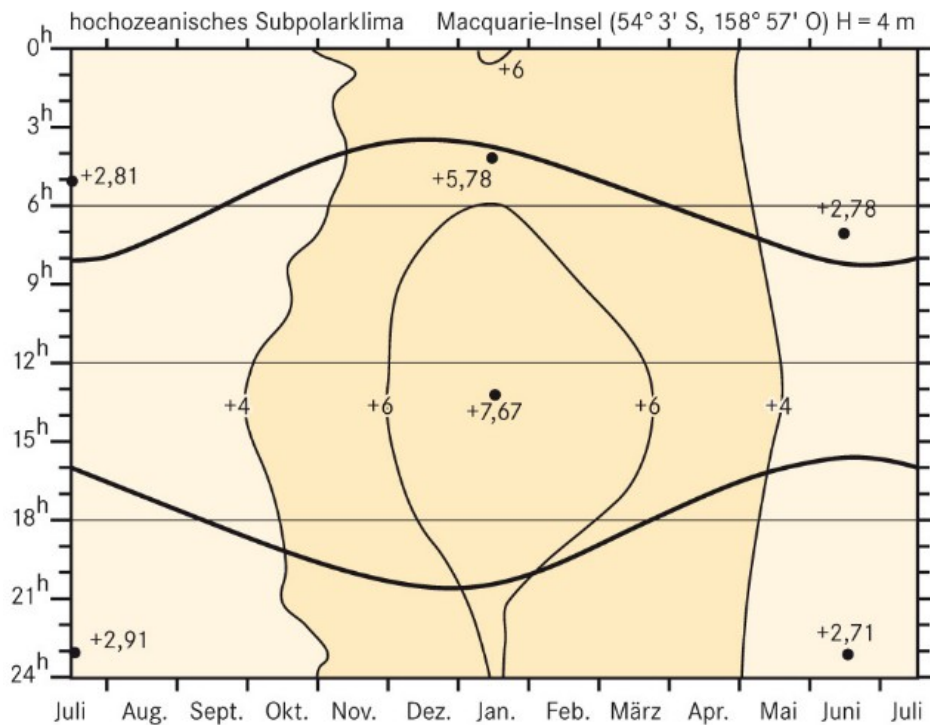


Pará. Äquatoriales Tieflandklima mit fast fehlender Jahreschwankung und mäßiger bis geringer Tagesschwankung.

Lufttemperatur

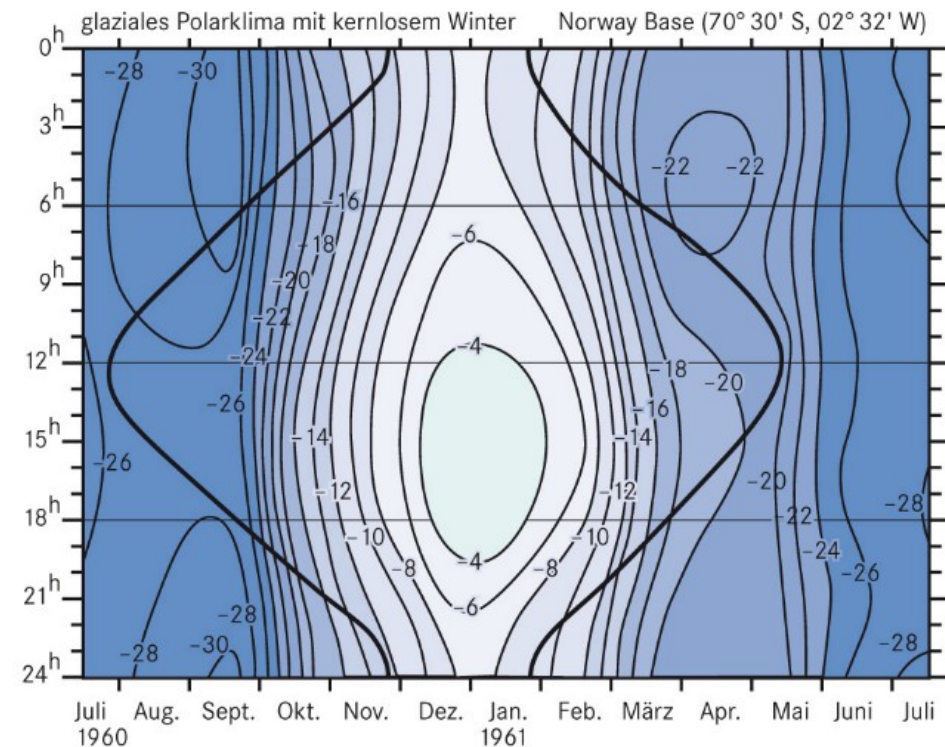
Tages- und jahreszeitliche Variationen der Lufttemperatur in räumlicher Differenzierung

Ausgeprägtes Jahreszeitenklima



Macquarie-Insel. Hochozeanisches Subpolarklima mit fast fehlender Tages- und Jahresschwankung.

(Gebhardt et al. 2007)

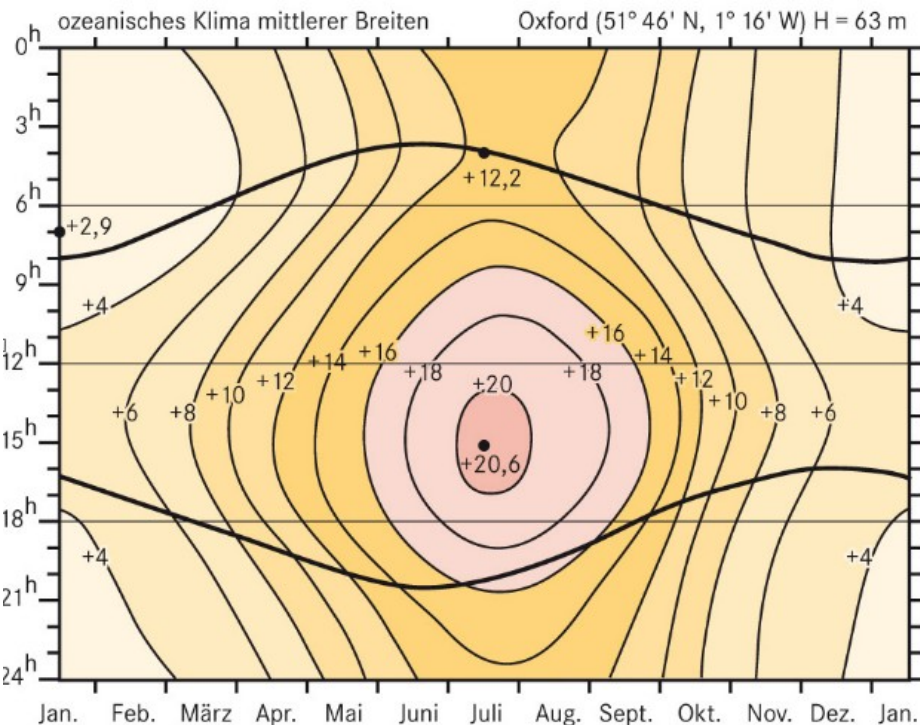


Norway Base (Antarktis). Glaziales Polarklima mit kernlosem Winter (Hauptminimum im September, Nebenminimum im April), fehlendem Tagesgang während der winterlichen Polarnacht, geringem Tagesgang im Südsommer. Der Temperaturanstieg im Oktober ist steiler als der Temperaturabfall im März. Beobachtungswerte 1960/61 der South African Antarctic Expedition I.

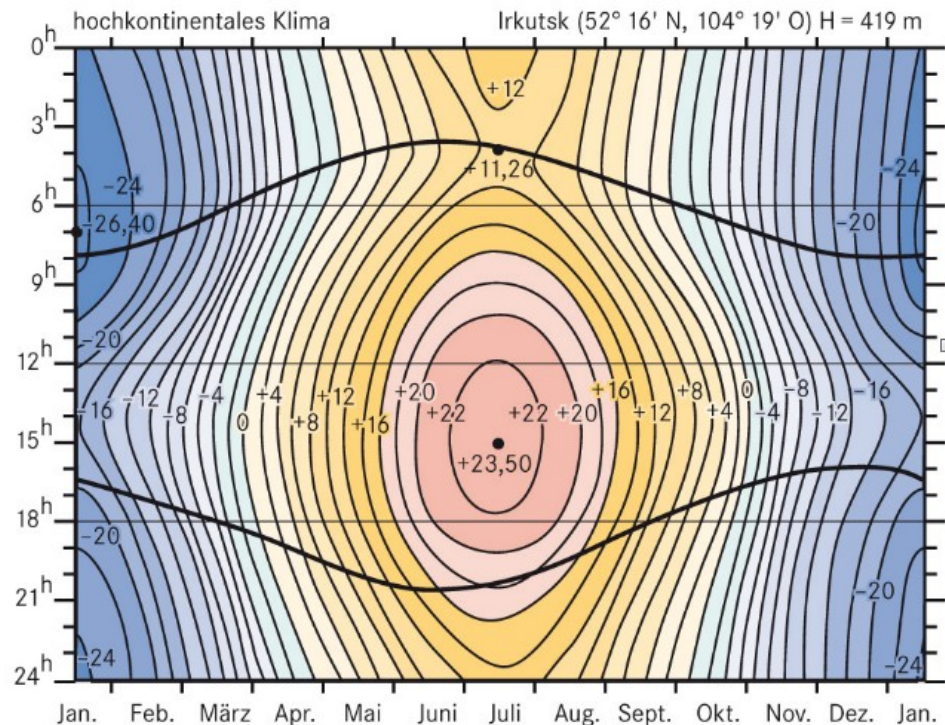
Lufttemperatur

Tages- und jahreszeitliche Variationen der Lufttemperatur in räumlicher Differenzierung

Jahreszeitenklima der Mittelbreiten



Oxford. Ozeanisches Klima mittlerer Breiten mit geringer, im Sommer leicht kontinental verstärkter Tagesschwankung und relativ geringer Jahresschwankung.



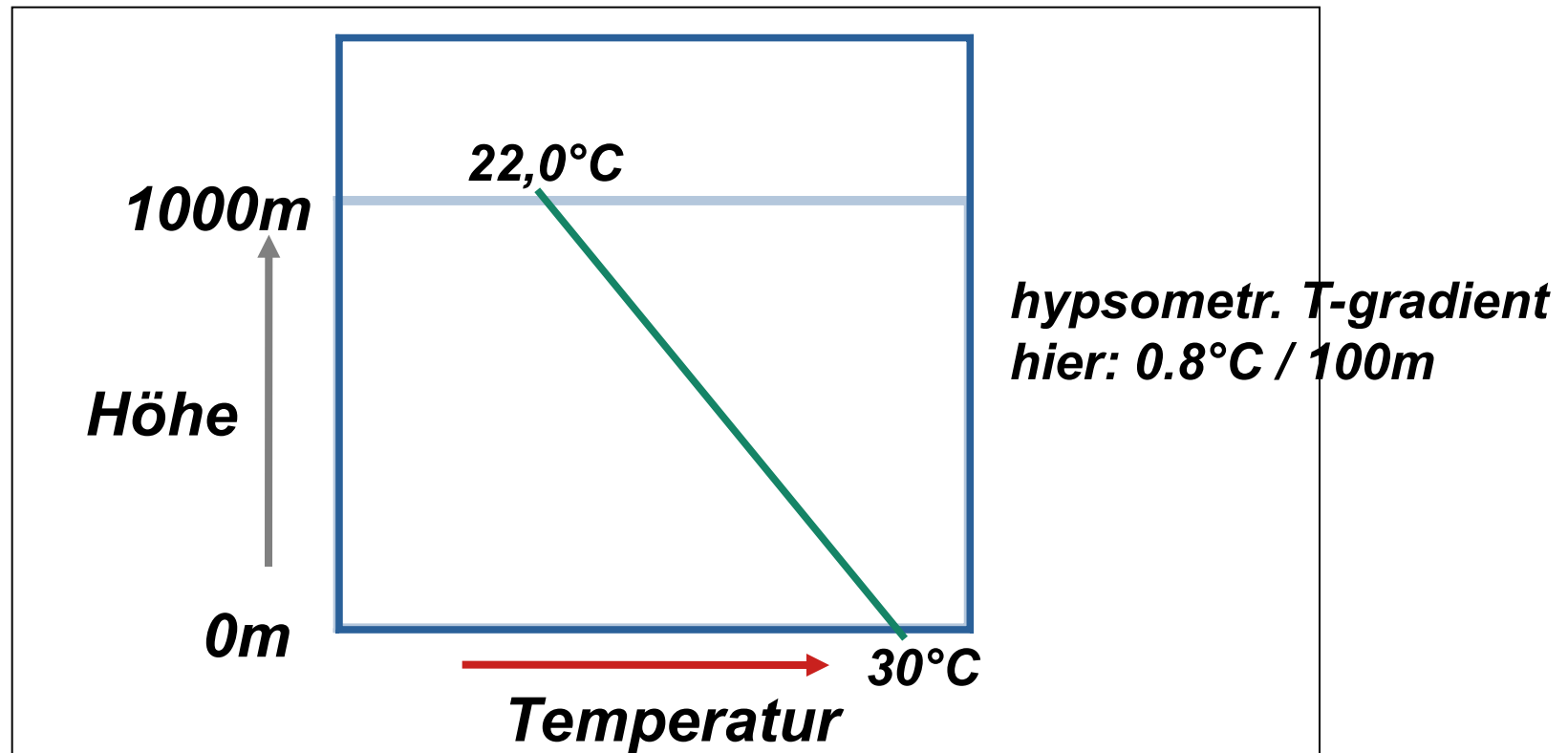
Irkutsk. Hochkontinentales Klima mit starken Tages- und Jahresschwankungen.

Lufttemperatur

Hypsometrischer Temperaturgradient

Maß für die **vertikale Temperaturabnahme**

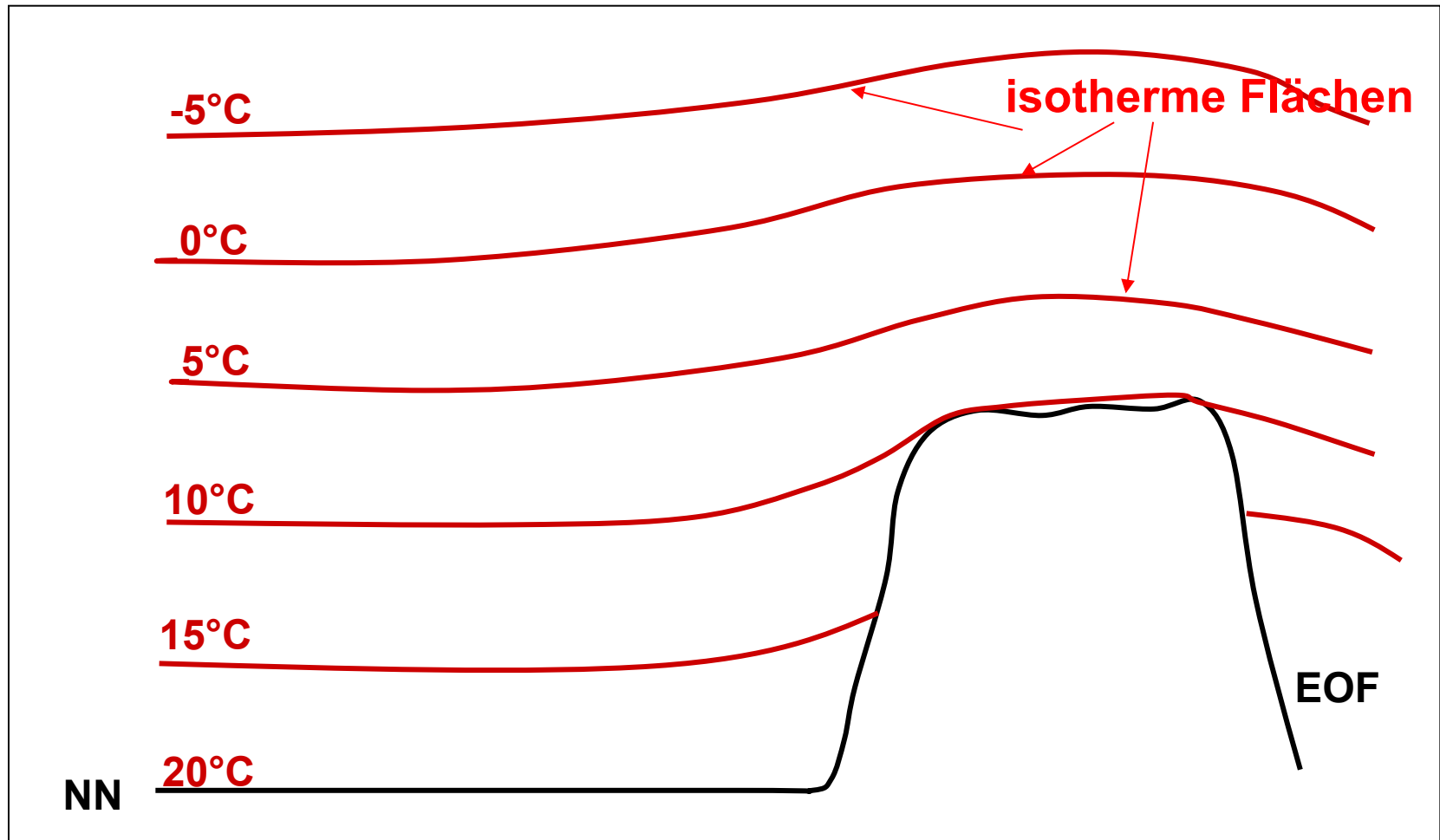
⇒ **meist zwischen 0.5 und 0.8°C pro 100m**



Ursache: Primäre Erwärmung der Atmosphäre an der Erdoberfläche

Lufttemperatur

Hypsometrischer Temperaturgradient



Massenerhebungseffekt ⇔ **hochgelegene Heizflächen**

Luftdruck

Definiert als:

Kraft, die die Atmosphäre oberhalb eines bestimmten Niveaus pro Fläche ausübt

Maßeinheit:

1 hPa = 100 Pa = 100 N*m⁻²

Druckabnahme mit der Höhe:

- durchschnittlicher Bodenluftdruck in Meeresniveau**
(SLP: sea level pressure): 1013 hPa
- in ca. 5,5km Höhe über NN: 500 hPa**
- in ca. 11km Höhe über NN: 250 hPa**

Luftdruck

Definiert als:

Kraft, die die Atmosphäre oberhalb eines bestimmten Niveaus pro Fläche ausübt

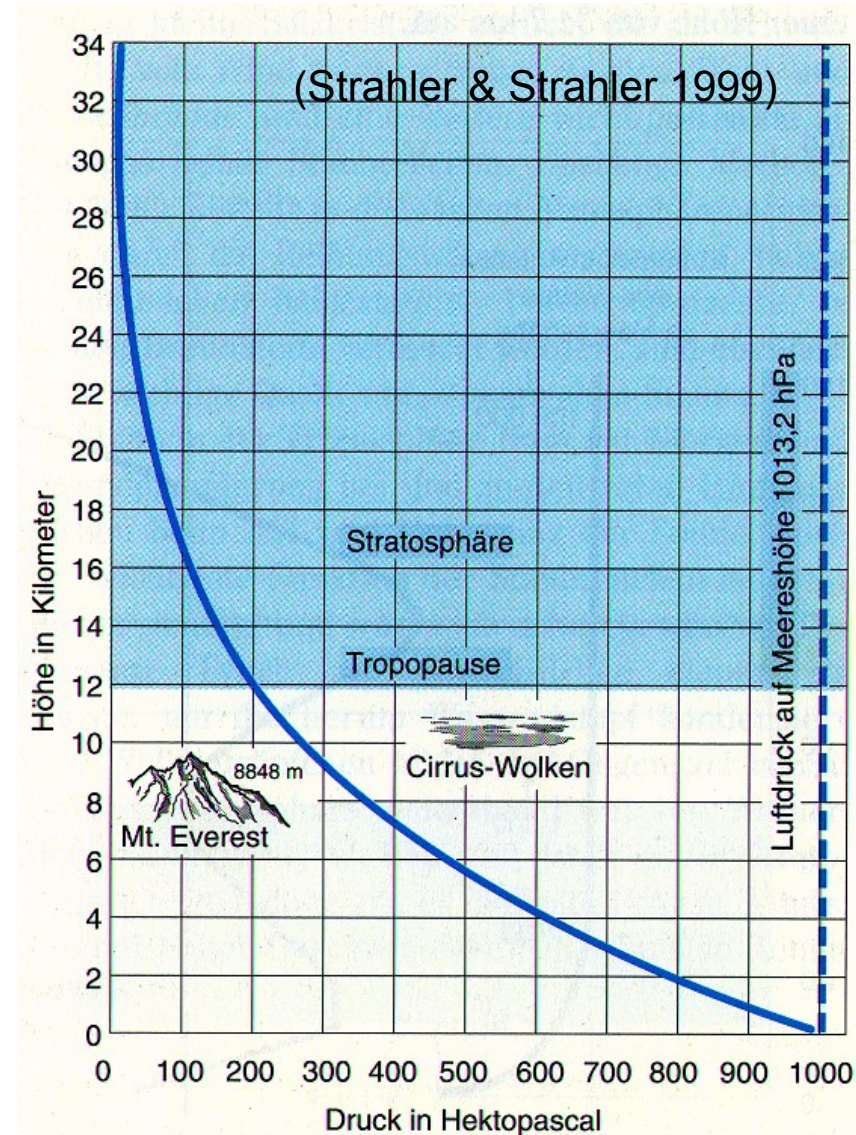
Maßeinheit:

$$1 \text{ hPa} = 100 \text{ Pa} = 100 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$$

Druckabnahme mit der Höhe:

- **durchschnittlicher Bodenluftdruck in Meeresniveau**
(SLP: sea level pressure): **1013 hPa**
- **in ca. 5,5km Höhe über NN: 500 hPa**
- **in ca. 11km Höhe über NN: 250 hPa**

⇒ **nicht-lineare Funktion der vertikalen Luftdruckabnahme!**



Luftdruck

Hydrostatische Grundgleichung:

⇨ beschreibt Beziehungen zwischen Luftdruck und Höhe

$$- dp = g * \rho * dz$$

dp: Änderung des Luftdrucks p
dz: Änderung der Höhe
g: Erdbeschleunigung
 ρ : Luftdichte

Zustandsgleichung idealer Gase:
(Boyle – Mariotte – Gay – Lussac)

$$p * V = R * T$$

p: Druck
V: Volumen
R: Gaskonstante
T: absolute Temperatur

$$\rho = p / (R * T)$$

ρ : Dichte

Luftdruck

Hydrostatische Grundgleichung:

⇨ beschreibt Beziehungen zwischen Luftdruck und Höhe

$$- dp = g * (p/(R*T)) * dz$$

dp: Änderung des Luftdrucks p
dz: Änderung der Höhe
g: Erdbeschleunigung
ρ: Luftdichte

Folgerungen:

⇒ der Luftdruck nimmt in einer kalten Atmosphäre mit zunehmender Höhe schneller ab als in einer warmen Atmosphäre.

⇒ je höher der Ausgangsluftdruck, umso stärker ist die vertikale Luftdruckabnahme

Luftdruck

Hydrostatische Grundgleichung:

⇨ beschreibt Beziehungen zwischen Luftdruck und Höhe

$$- dp = g * (p / (R * T)) * dz$$

Anwendungen:

Formen der barometrischen Höhenformel:

$$p = p_0 \cdot e^{-\left(g / R \cdot T\right) \cdot z}$$



Bestimmung des Druckes
in vorgegebenen Höhen

$$z = \left(R \cdot T / g \right) \cdot \ln \left(p_0 / p \right)$$



Bestimmung der Höhendifferenz
zwischen zwei Druckniveaus

z = Höhendifferenz

p = Luftdruck in der Höhe

p_0 = Luftdruck am Boden

Luftfeuchtigkeit

definiert als:

Anteil des Wasserdampfs am Luftgemisch

⇨ abhängig von Wasserverfügbarkeit und Lufttemperatur

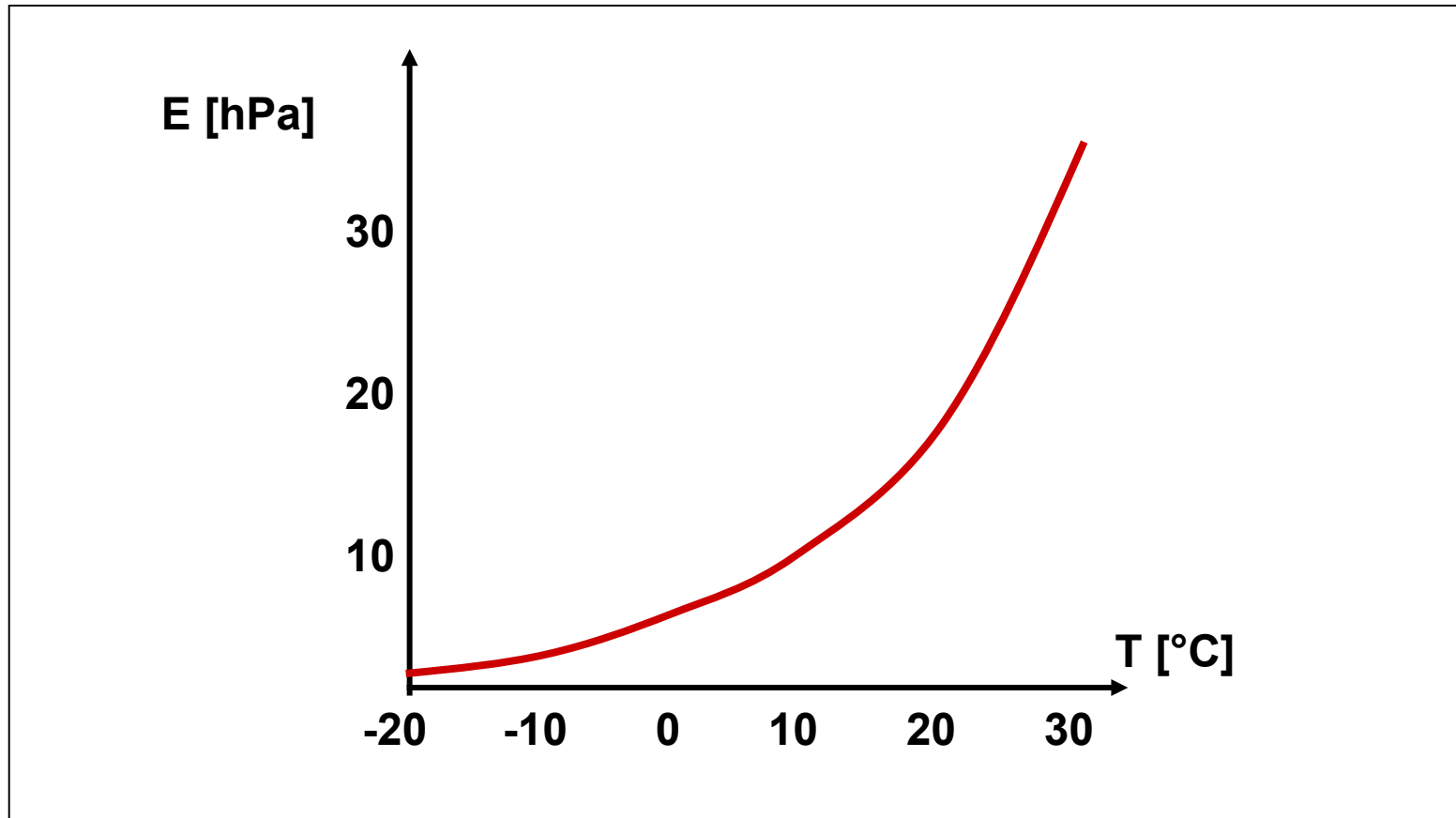
Verschiedene Feuchtemaße:

Dampfdruck e : Partialdruck des Wasserdampfs [hPa]

Taupunkttemperatur τ : Temperatur, bei der der tatsächliche Dampfdruck (e) dem **Sättigungsdampfdruck (E)** entspricht

Luftfeuchtigkeit

Temperaturabhängigkeit des Sättigungsdampfdrucks



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

Luftfeuchtigkeit

definiert als:

Anteil des Wasserdampfs am Luftgemisch

⇐ abhängig von Wasserverfügbarkeit und Lufttemperatur

Verschiedene Feuchtemaße:

Dampfdruck e : Partialdruck des Wasserdampfs [hPa]

Taupunkttemperatur τ : Temperatur, bei der der tatsächliche Dampfdruck (e) dem Sättigungsdampfdruck (E) entspricht

Sättigungsdefizit: $E - e$

relative Luftfeuchtigkeit: $(e/E) * 100$ [%]

absolute Luftfeuchtigkeit: Wasserdampfmasse pro Luftvolumen [g/m³]

spezifische Feuchte: Wasserdampfmasse pro Masse feuchter Luft [g/kg]

Mischungsverhältnis: Wasserdampfmasse pro Masse trockener Luft [g/kg]

Feuchttemperatur: Temperatur an befeuchtetem Fühler

Luftfeuchtigkeit

Messung der Luftfeuchtigkeit:

- z.B. Haarhygrometer, ...
- zuverlässigste Messung mit **Psychrometer**

⇔ Psychrometrische Differenz
zwischen Trocken- und
Feuchttemperatur als Maß
für die Luftfeuchtigkeit



Verdunstung

⇔ Übergang von H_2O vom flüssigen (festen ⇒ Sublimation) in den gasförmigen Aggregatzustand

Verdunstung

Arten der Verdunstung:

Evaporation (E_B)

Verdunstung freier Wasserflächen oder unbewachsener Oberflächen

Transpiration (E_T)

Verdunstung durch Lebewesen (insbes. Pflanzen)

Interzeption(sverdunstung) (E_I)

Verdunstung von pflanzlichen Oberflächen

Gesamtverdunstung = **Evapotranspiration** (E_V)

$$E_V = E_B + E_T + E_I$$

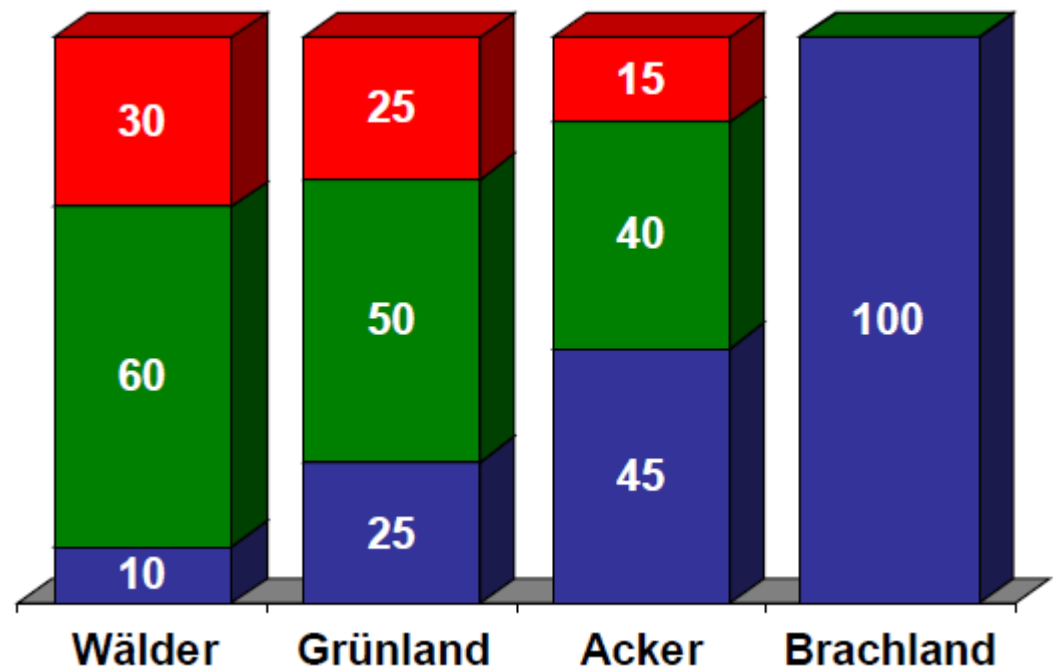
Verdunstung

Arten der Verdunstung:

$$E_V = E_B + E_T + E_I$$

Prozentuale Aufteilung
für Mitteleuropa

E_B E_T E_I



Verdunstung

Arten der Verdunstung:

Aktuelle (reale) Evapotranspiration:

E_A

Wasservolumen, das bei den **gegebenen klimatischen Randbedingungen** und **tatsächlichem Wasserangebot** an die Atmosphäre abgegeben wird.

Potentielle (mögliche) Evapotranspiration:

E_P

Wasservolumen, das eine ganz oder teilweise mit Vegetation bedeckte, unter **optimaler Wasser- und Nährstoffversorgung** stehende Fläche bei **ungehindertem Wassernachschub** unter den **gegebenen Randbedingungen** pro Zeiteinheit maximal an die Atmosphäre abgeben kann.

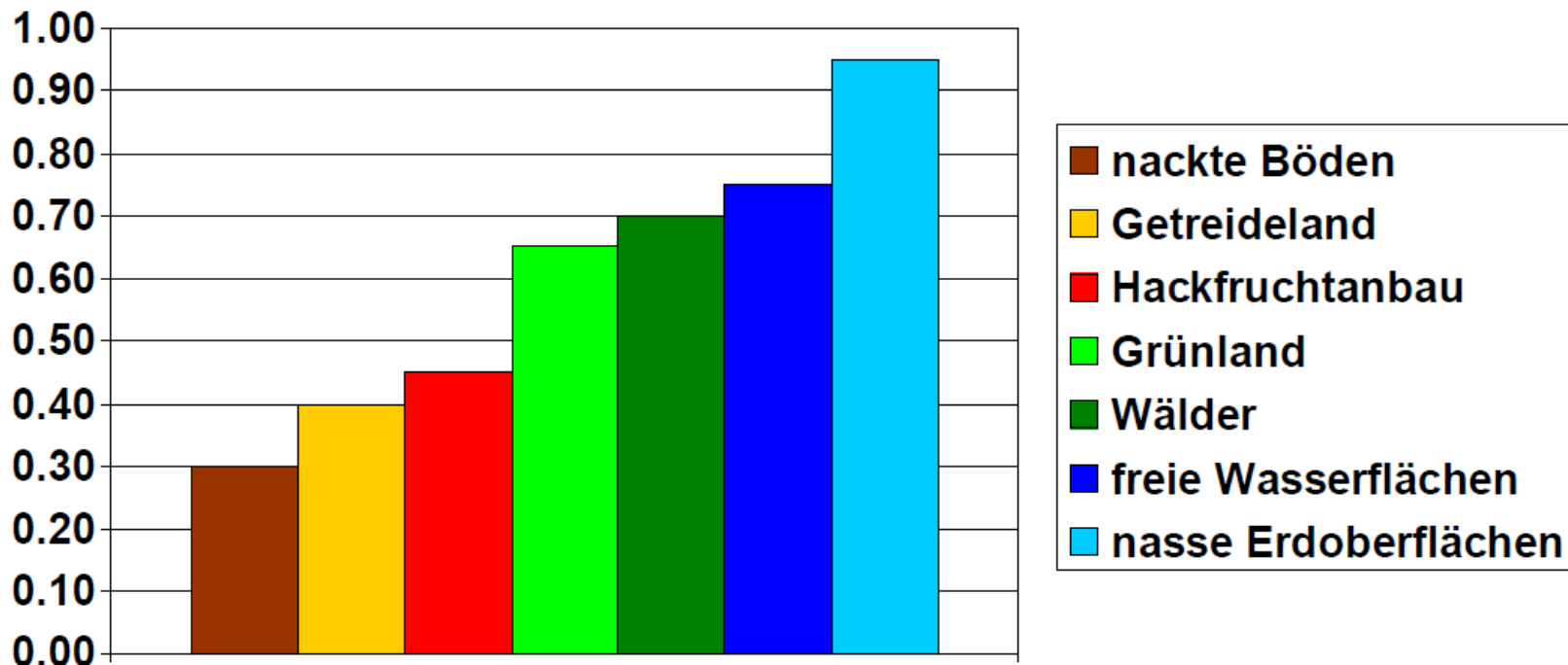
Verdunstung

Verdunstungsverhältnis:

$$\text{Verdunstungsverhältnis: } \frac{E_a}{N}$$

N: Niederschlag

Verdunstungsverhältnis für verschiedene Oberflächenbedeckungsarten



(nach Baumgartner & Liebscher 1996)

Verdunstung

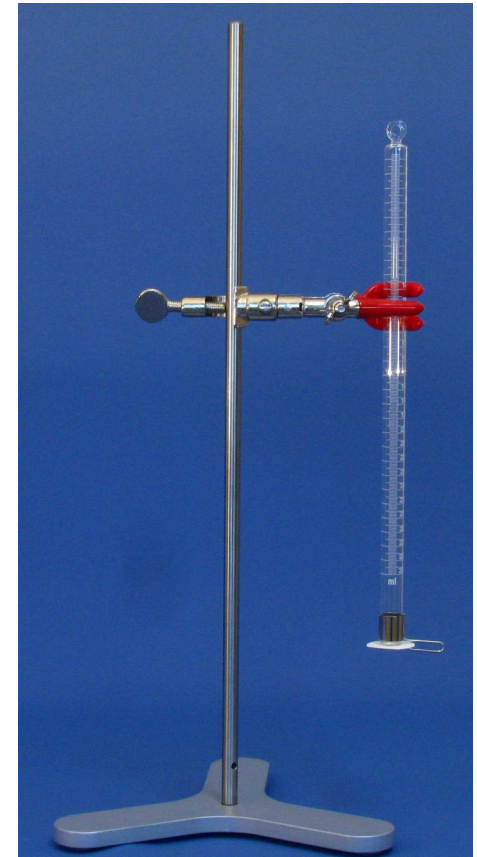
Verdunstungsmessung

Messung des
Verdunstungsanspruchs der
Atmosphäre



Inst. f. Pflanzenbauwissenschaften HU Berlin

z.B.
Piché-Evaporimeter

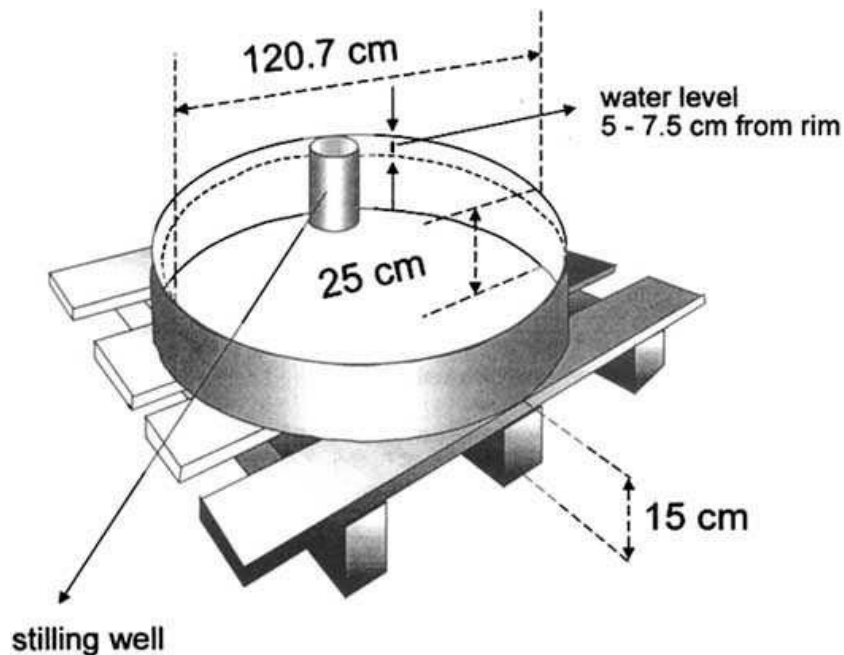


(<http://www.rfuess-mueller.de>)

Verdunstung

Verdunstungsmessung

Messung der Verdunstung offener Wasseroberflächen



(<http://www.fao.org>)

z.B. Class A Pan



**Class A Evaporation Pan with Automatic Sensing
Refill Kit and Bird Guard**

(www.enviromdata.com.au)

Verdunstung

Verdunstungsmessung

Messung der
Verdunstung fester
Bodenvolumina



(<http://www.iac.ethz.ch>)

z.B.
Sickerwasser-Lysimeter
wägbare Lysimeter



Wägbare Lysimeteranlage

Verdunstung

Verdunstungsberechnung:

Berechnung der aktuellen (realen) Verdunstung:

$$E_A = N - A$$

N = Niederschlag

A = Abfluß

Verdunstung

Verdunstungsberechnung:

Verdunstungsformel (nach Haude) - Berechnung der potentiellen Verdunstung

$$V = k * (E - e) = k * E * \left(1 - \frac{RF}{100}\right)$$

E: Sättigungsdampfdruck um 14 Uhr

RF: rel. Luftfeuchte um 14 Uhr

e: Dampfdruck um 14 Uhr

Monatswerte des Koeffizienten k:

| J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | N | D |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 0,20 | 0,20 | 0,21 | 0,29 | 0,29 | 0,28 | 0,26 | 0,25 | 0,23 | 0,22 | 0,20 | 0,20 |

weitere Ansätze zur Verdunstungsberechnung:
nach Wagner, Turc, Penman, ...

Verdunstung

Verdunstungsberechnung:

Verdunstungsformel (nach Haude) - Berechnung der potentiellen Verdunstung

Werte für den Haude-Koeffizienten k:

| k | Wiese | Rasen | Mais | Buche | Fichte |
|------------------|-------|-------|------|-------|--------|
| Januar | 0.2 | 0.2 | 0.11 | 0.01 | 0.08 |
| Februar | 0.2 | 0.2 | 0.11 | 0 | 0.04 |
| März | 0.25 | 0.23 | 0.11 | 0.04 | 0.14 |
| April | 0.29 | 0.24 | 0.17 | 0.1 | 0.35 |
| Mai | 0.29 | 0.29 | 0.21 | 0.23 | 0.39 |
| Juni | 0.28 | 0.29 | 0.24 | 0.28 | 0.34 |
| Juli | 0.26 | 0.28 | 0.25 | 0.32 | 0.31 |
| August | 0.25 | 0.26 | 0.26 | 0.26 | 0.25 |
| September | 0.23 | 0.23 | 0.21 | 0.17 | 0.2 |
| Oktober | 0.22 | 0.2 | 0.18 | 0.1 | 0.13 |
| November | 0.2 | 0.2 | 0.11 | 0.01 | 0.07 |
| Dezember | 0.2 | 0.2 | 0.11 | 0 | 0.05 |

(nach Häckel 1999)