

Vorlesung „Allgemeine Meteorologie“

Prof. Michael Kunz

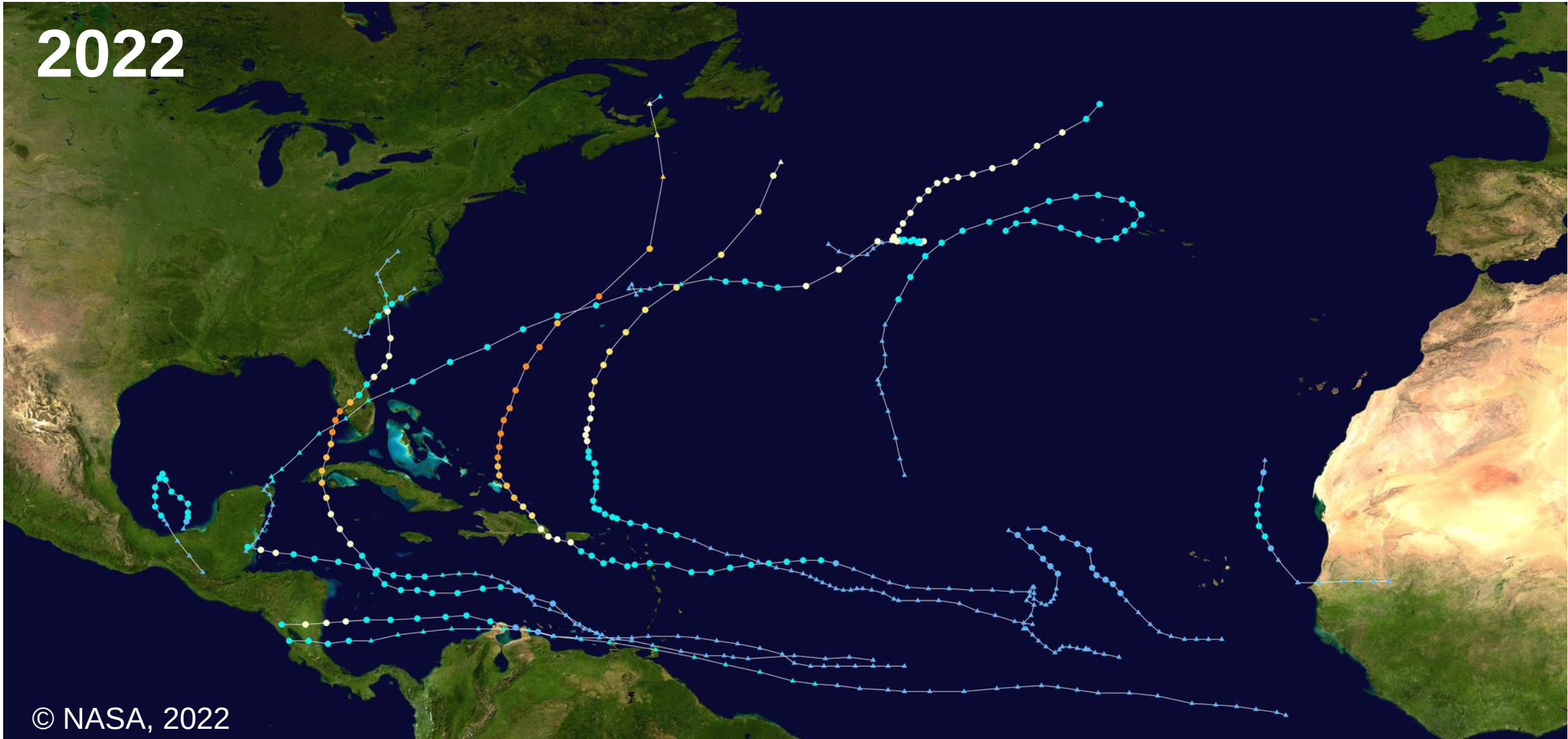


Das Wetter...



Hurrikan Saison (Atlantik): 30 Juni bis 30 November

2022



© NASA, 2022

Hurrikan Saison (Atlantik)

NOAA predicts above-normal 2022 Atlantic Hurricane Season

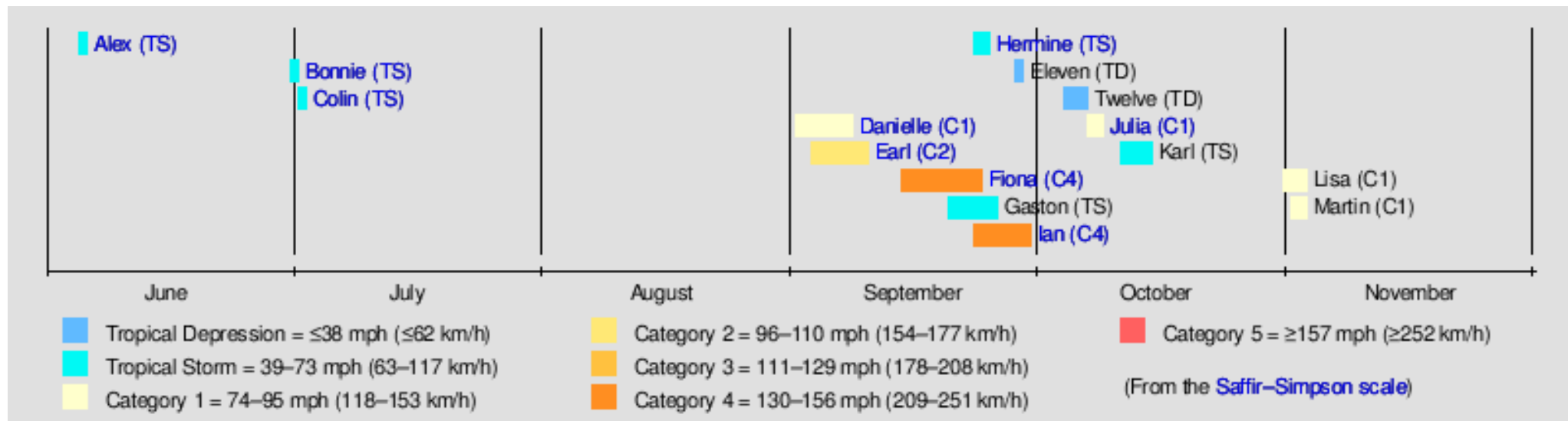
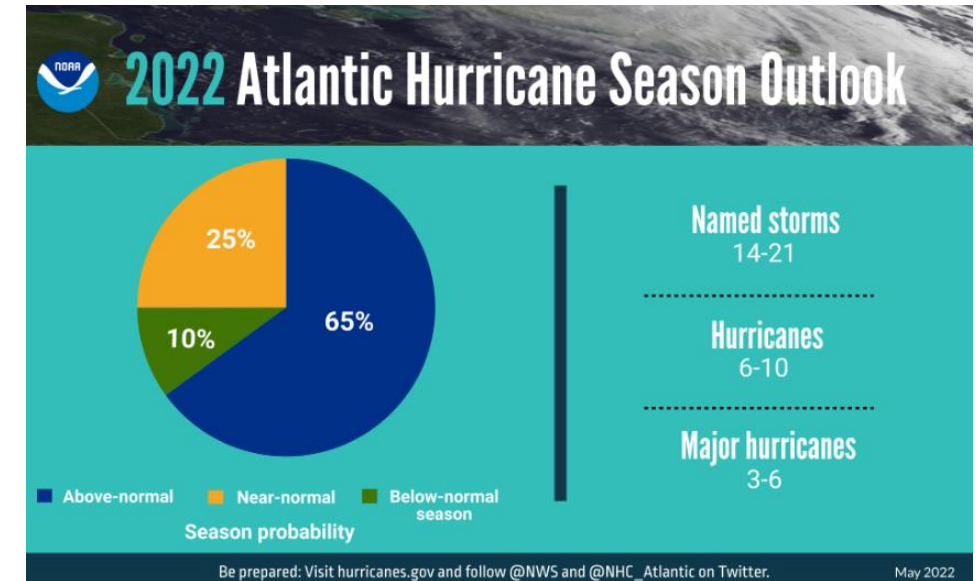
Ongoing La Niña, above-average Atlantic temperatures set the stage for busy season ahead

Focus areas: Weather Topics: hurricanes , hurricane season

Share: [Twitter](#) [Facebook](#) [Email](#) [Print](#)

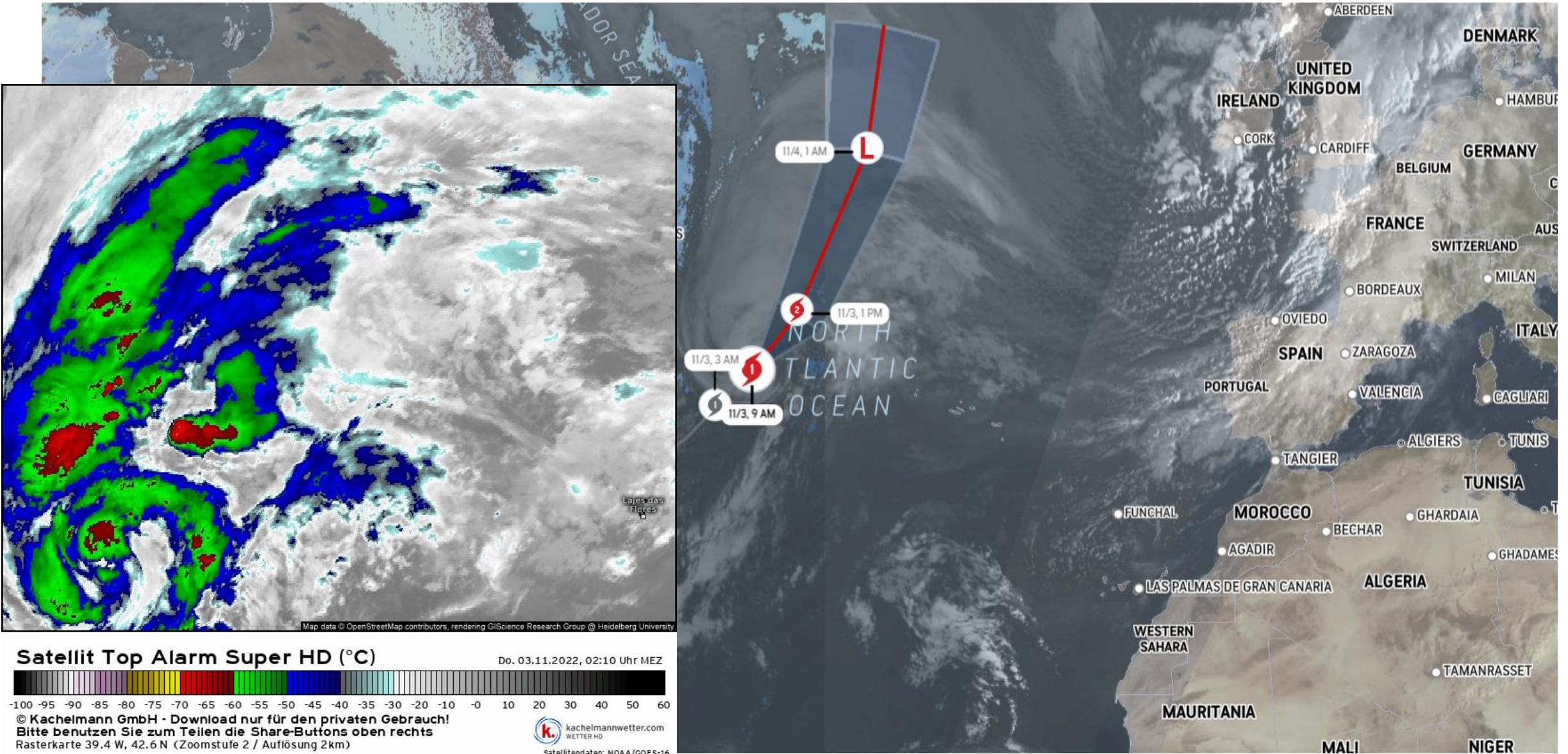
May 24, 2022

tropische Wirbelstürme:
- v.a. gefährlich für & wegen Niederschlag

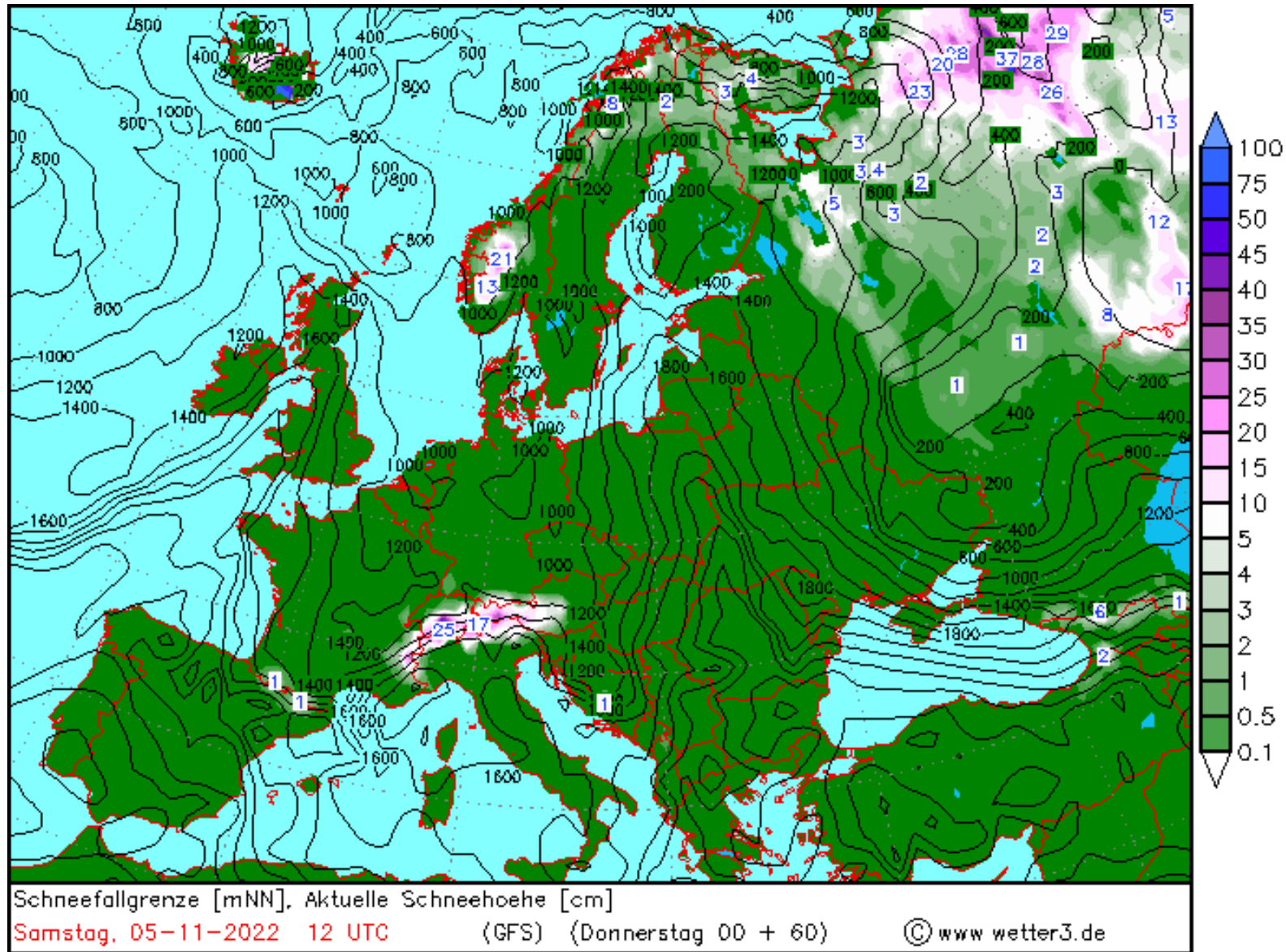


→ asym. Wirbel

Hurrikan Martin



Bodenwetterkarte

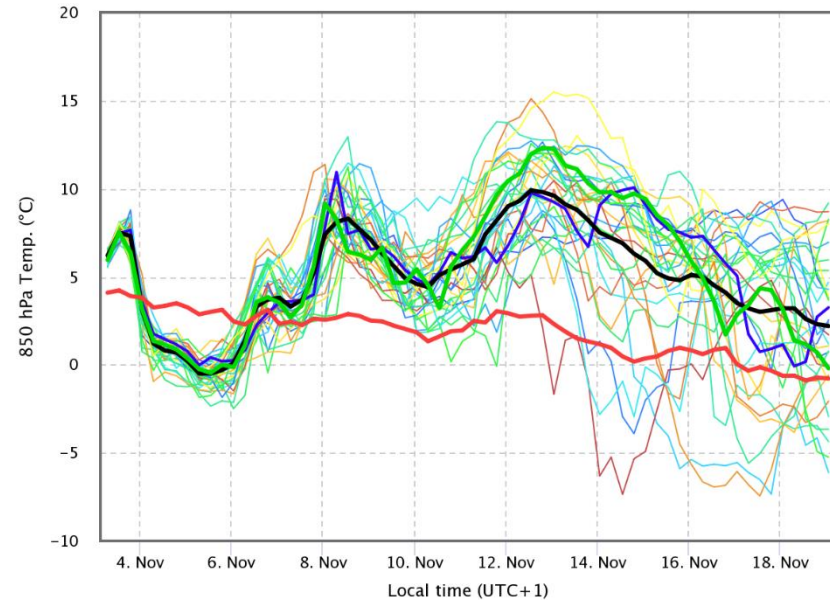


$v_{wind} \sim \rho_{gradient}$

Vorhersage: Ensembles

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

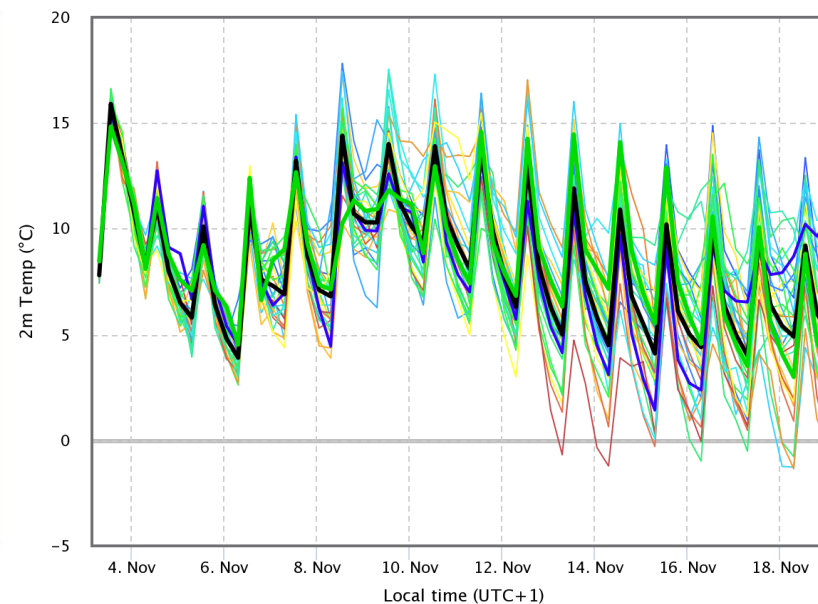
T_{850 hPa}



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

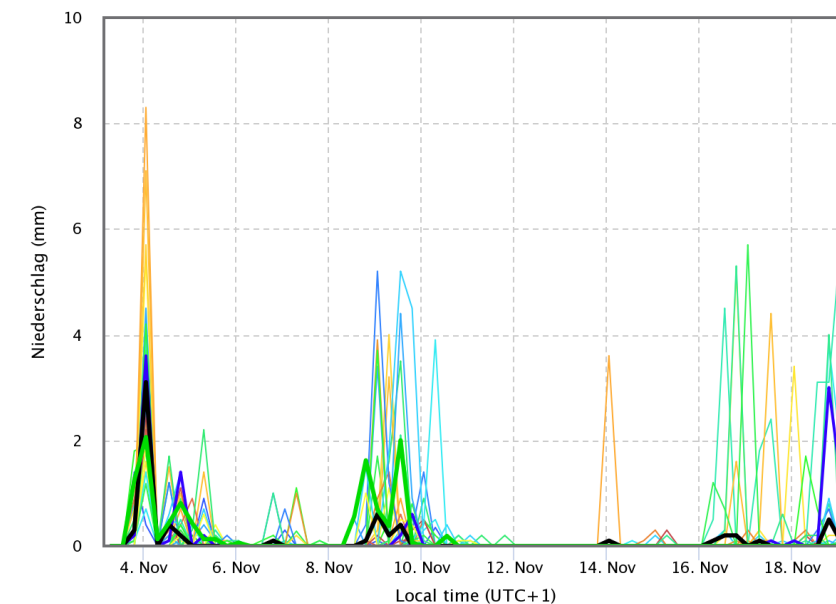
T_{2m}



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 — LT MEAN 1981-2010

wetterzentrale.de

Niederschlag



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

Vorlesung „Allgemeine Meteorologie“

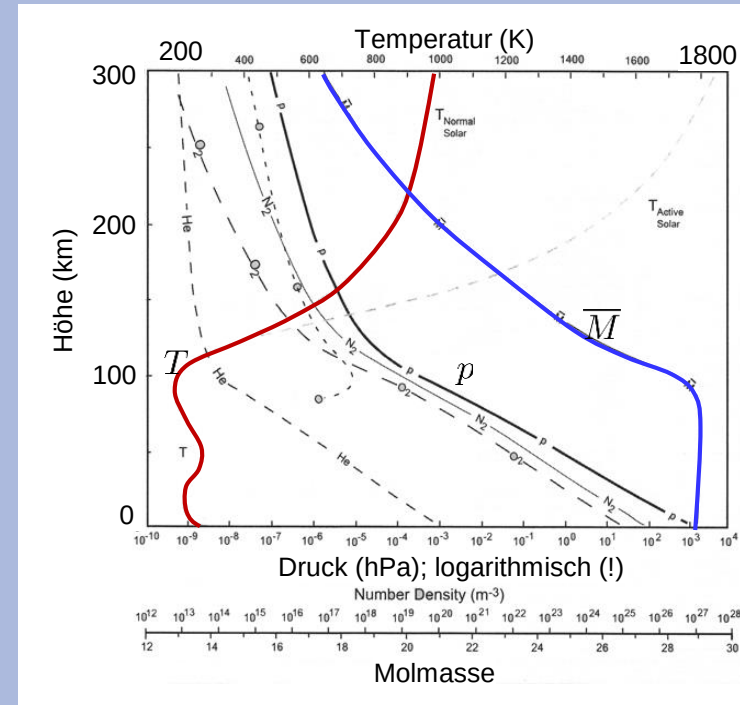
Prof. Michael Kunz

Kapitel 3: Zustandsvariablen, Zustandsgleichung und meteorologische Größen



Letzte Vorlesung...

- Luft: Gemisch aus **Gasen** (v.a.: N_2 , O_2 , Ar)
Volumenanteile + Eigenschaften + molare Masse **konstant** bis
rund 100 km
→ Ausnahmen: Ozon, Wasserdampf
- **Wasserdampf**: Verteilung sehr variabel, fkt (T,V); wichtigstes
Treibhausgas des natürlichen Treibhauseffekts
- Thermodynamische **Zustandsgrößen** (Temperatur, Luftdruck, Dichte
bzw. Volumen) beschreiben vollständig den Zustand im
thermodynamischen Gleichgewicht (stationär, keine Energie/Masseflüsse)
- Zustandsgrößen und met. Größen sind **4-dimensional**: $\zeta = \zeta(x, y, z, t)$
- **Dichte**: Masse / Volumen $\rho = \frac{m}{V}$
- **Luftdruck**: Folge der Gewichtskraft der darüber liegenden Luft (mikroskopisch: Stoßprozesse); $p = \frac{F}{A}$
Einheit: hPa = 100 Pa = 100 N m⁻² = 100 kg m⁻¹ s⁻²
- Erhebliche Massenänderungsraten durch Tiefdruckgebiete (Bsp. Friedhelm)



3.1 Meteorologische Zustandsvariablen

3.1.1 Dichte (Volumen)

3.1.2 Luftdruck

3.1.3 Temperatur

3.2 Zustandsgleichung für ideale Gase

3.3 Zustandsgleichung einer Mischung idealer Gase

3.4 Wind (siehe auch Kap. 7)

3.5 Niederschlag (siehe auch Kap. 9)

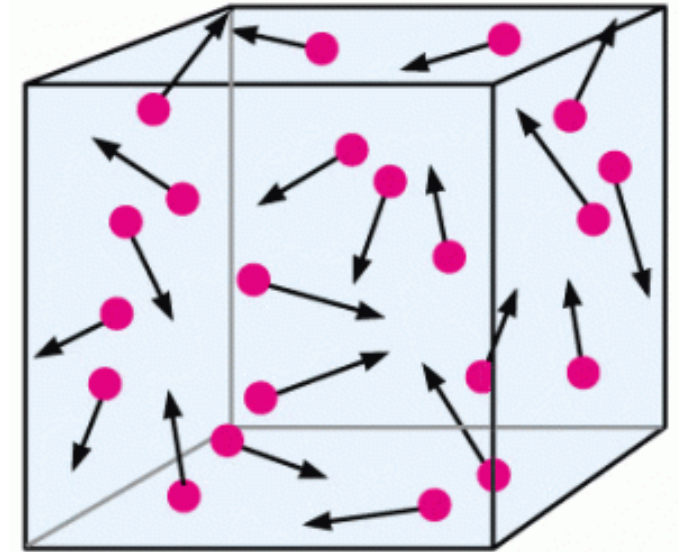
Fragen über Fragen...

- Was ist die **mittlere freie Weglänge**? *→ Strecke zw. 2 Stößen von Molekülen*
- Und wie lange ist diese (ca.)?
 - 0,0001 mm
 - 0,01 mm
 - 1 mm
- Wie hoch ist die **Molekulargeschwindigkeit** (z.B. Stickstoff bei Normalbedingungen)?
 - 5,2 m s⁻¹
 - 52 m s⁻¹
 - 520 m s⁻¹ *← häufige Prüfungsfrage!*

3.1.3 Die Temperatur

Kinetische Gastheorie

- **Mikroskopischer Zugang zur Wärmelehre** ausgehend von Gesetzen aus der Mechanik; theoretische Ableitung und Berechnung der **makroskopischen Eigenschaften der Gase** aus Statistik
- Gasatome / -moleküle bewegen sich mit **großer Geschwindigkeit** vollkommen **regellos im Raum** umher, wobei sie oft miteinander zusammenstoßen
- Zwischen Stößen: geradlinige Bewegung auf der Strecke der mittleren freien Weglänge
- **Mittlere freie Weglänge** (Luft bei Normalbedingungen): $\sim 10^{-7}$ m
- **Zusammenhang** zw. Volumen, Druck, Temperatur, innerer Reibung...



3.1.3 Die Temperatur

- **Temperaturdefinition** (T in K) nach der kinetischen Gastheorie: **mittlere kinetische Energie** der Moleküle eines Gases

$$\overline{E} = \frac{3}{2}kT \quad \rightarrow \quad T = \frac{2\overline{E}}{3k}$$

↑
Freiheitsgrade

- $\overline{E}$: **mittlere kinetische Energie** eines Gasmoleküls
- T : **absolute Temperatur** in K (Kelvin)
- Vorfaktor 3/2: **drei Freiheitsgrade** der Translation; pro Freiheitsgrad ist die mittlere kinetische Energie: $\frac{1}{2} kT$
- k : Boltzmannkonstante ($= 1,3803 \cdot 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$)

3.1.3 Die Temperatur

- **Temperaturdefinition** (T in K) nach der kinetischen Gastheorie: **mittlere kinetische Energie** der Moleküle eines Gases

$$\overline{E} = \frac{3}{2}kT \quad \rightarrow \quad T = \frac{2\overline{E}}{3k}$$

- Definition **kinetische Energie**: wenn m die Masse des Moleküls und $\overline{v}$ seine mittlere Geschwindigkeit ist, dann gilt auch:

*↪ betrachten immer
mittlere Zustände*

$$\overline{E} = \frac{1}{2}m\overline{v^2} \quad \Rightarrow \quad T = \frac{m\overline{v^2}}{3k}$$

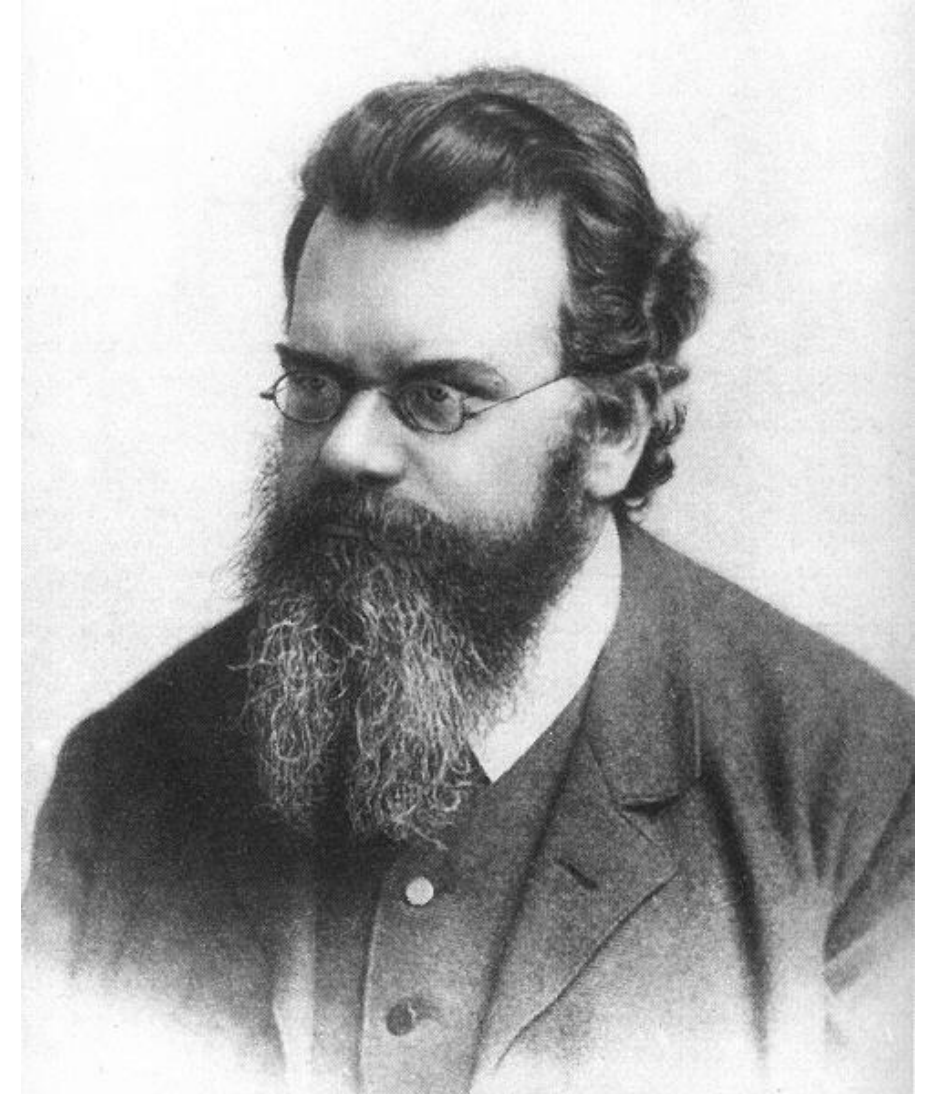
3.1.3 Die Temperatur

■ Ludwig Boltzmann (1844-1906)

- österr. Physiker und Philosoph
- wichtige Arbeiten zu Thermodynamik (Boltzmann-Statistik) und Strahlung (Stefan-Boltzmann Gesetz)
↳ 2. Person Ü
- Entropie als Maß für die Unordnung eines Systems, proportional zur Zahl Ω der möglichen Mikrozustände

$$S = k \ln \Omega$$

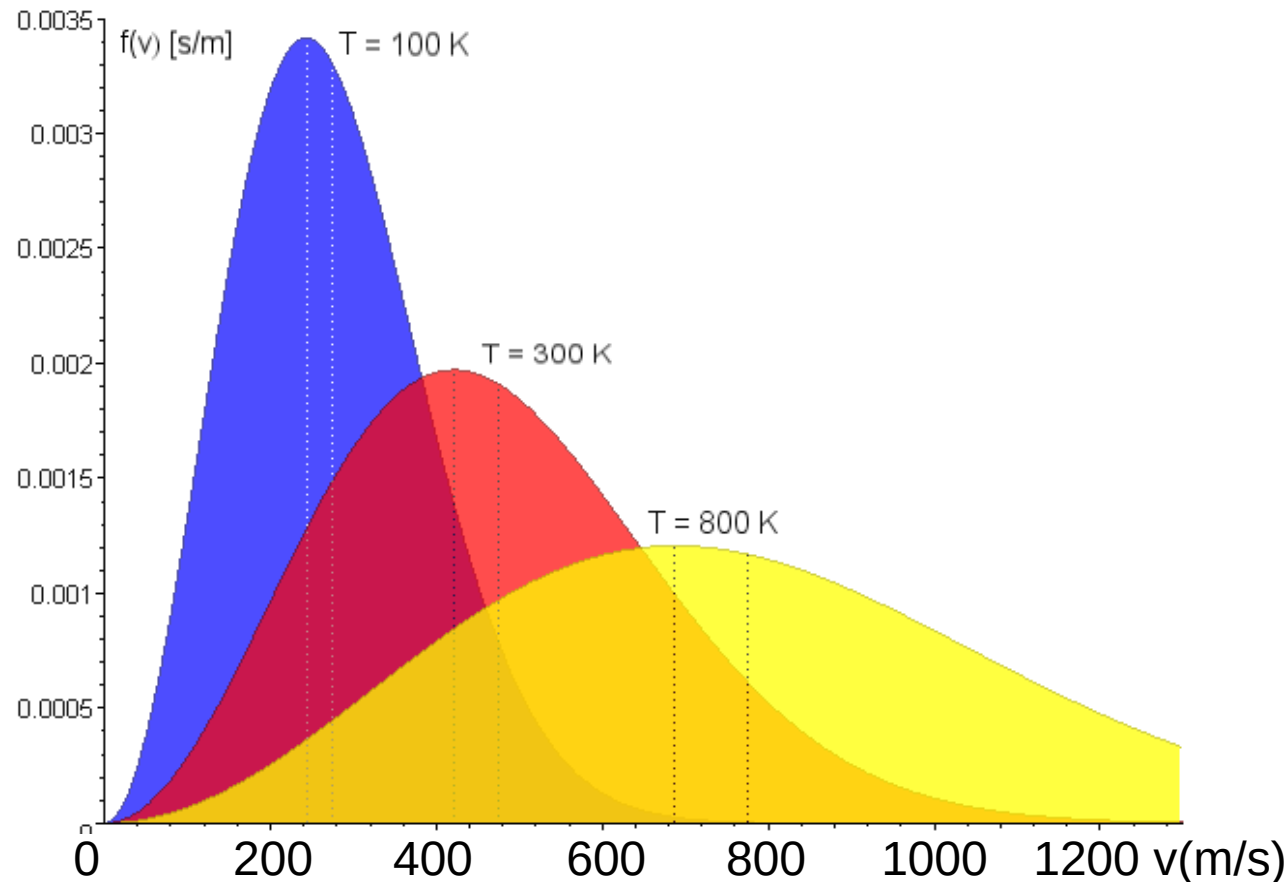
Entropie kann nur abnehmen (z.B. kaputte Kreide setzt sich nicht wieder zusammen)



3.1.3 Die Temperatur

- Beispiel: mittlere Geschwindigkeit eines **Stickstoffmoleküls** bei Normalbedingungen ($T = 273,15 \text{ K}$, $p = 1013,25 \text{ hPa}$) → Übung; **Prüfung (!)**
- mittlere Geschwindigkeit folgt Maxwell-Boltzmann-Verteilung

X ?



(wikipedia, 2020)

3.1.3 Die Temperatur

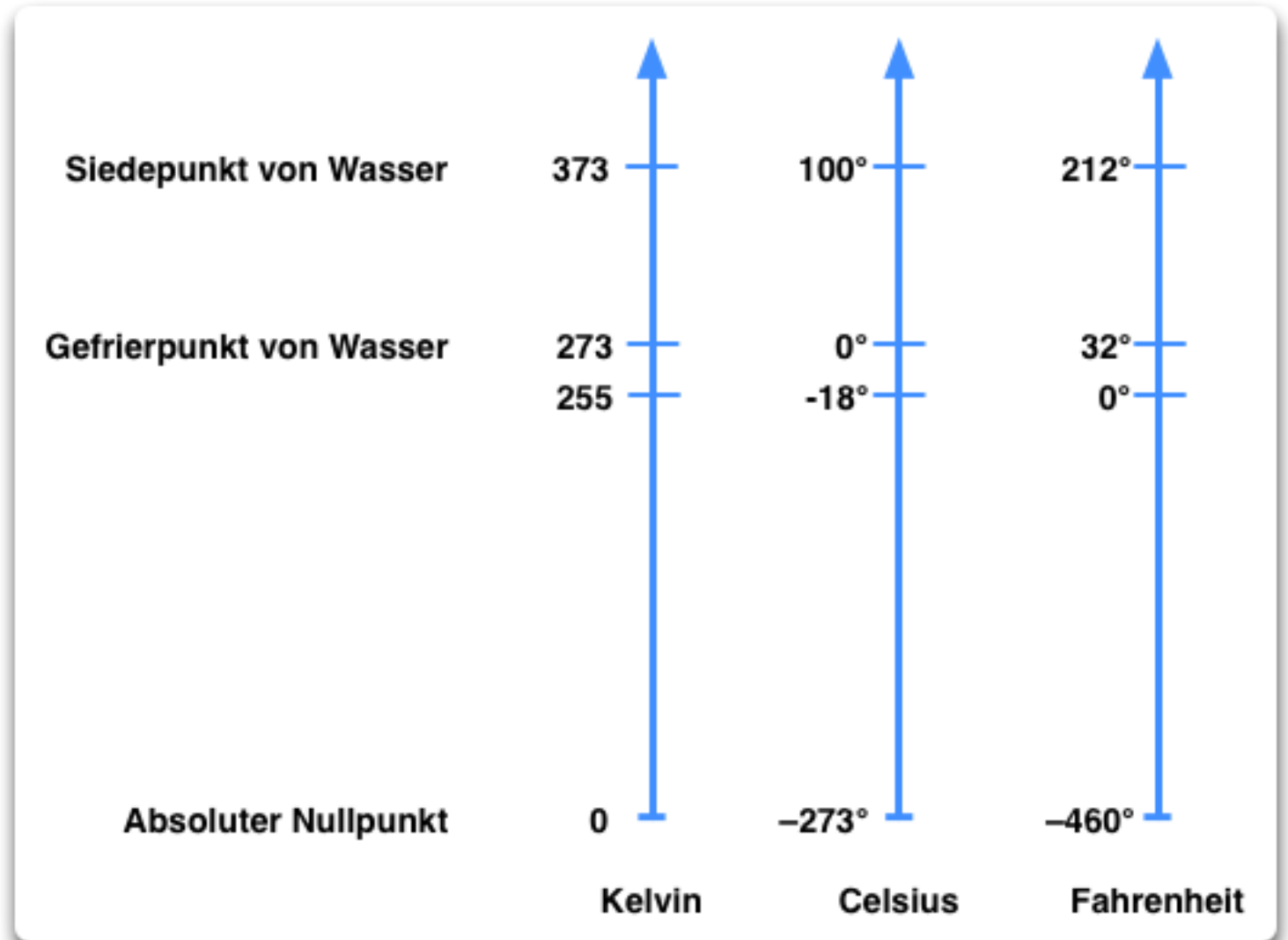
Temperaturskalen



G. Galilei (1564 – 1642)
1592 Erfindung des
Thermometers



Anders
Celsius
(1701-1744)



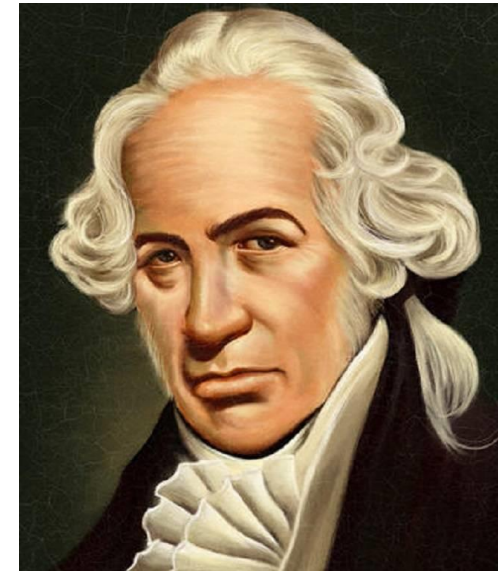
3.1.3 Die Temperatur

■ Temperaturskalen: Umrechnung °C in °F:

$$\vartheta(\text{in } ^\circ\text{C}) = \frac{5}{9}(X(\text{in } ^\circ\text{F}) - 32)$$

■ Fixpunkte auf der Skala von 0-100:

- Bluttemperatur $\vartheta = 37,7^\circ\text{C} = 100^\circ\text{F}$
- tiefste von Fahrenheit gemessene Temperatur:
 $\vartheta = -17,78^\circ\text{C} = 0^\circ\text{F}$ (gemessen im Winter 1708/1709 bei Danzig; später reproduziert aus Gemisch Eis, Wasser und Salmiak)
- Gebräuchlich nur in USA und einigen wenigen engl.-sprachigen Ländern



Daniel Gabriel Fahrenheit
(1686-1736)

Fragen über Fragen...

- Was ist ein ideales **Gas**?
 - nur elastische Stöße zw. Molekülen
 - keine Wechselwirkung zw. Teilchen (VdW-Kräfte verschwinden)
 - volumenlos
- Welche **Zustandsänderungen** kennen Sie?
 - isochor
 - isotherm
 - isobar
 - adiabatisch
- Was sagt die **Zustandsgleichung** aus?
 - verknüpft Zustandsgrößen
- Wie setzt sich der **Luftdruck eines Gasgemischs** zusammen?
 - Vol - Anteile Gase

3.2 Zustandsgleichung für ideale Gase

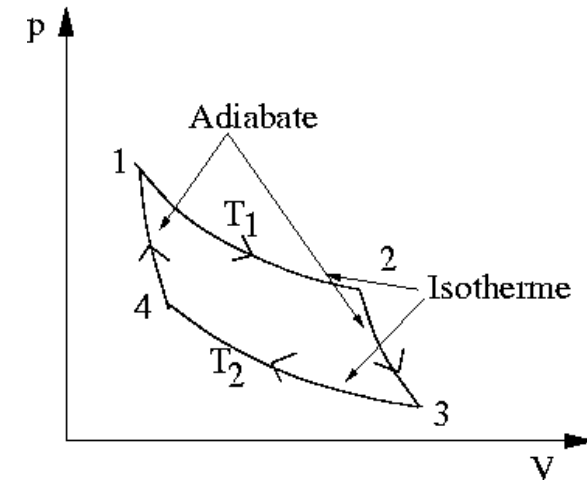
Zustandsänderung

■ **Zustandsänderungen:** Übergang eines Systems von einem Zustand in einen anderen

- **isobar** ($p = \text{const.}$)
- **isotherm** ($T = \text{const.}$)
- **isochor** ($V = \text{const.}$)
- **adiabatisch** (kein Austausch Wärmeenergie)
- ...

■ Annahme: **ideales Gas**

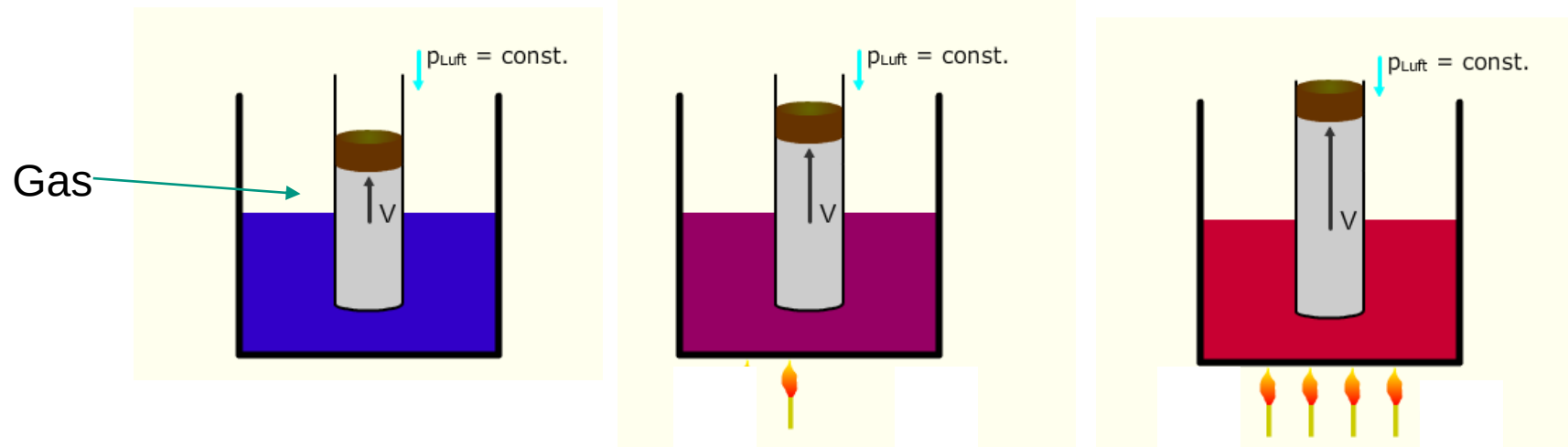
- Gasteilchen als ausdehnungslose Massepunkte angenommen
- hochverdünnt
- keine Kräfte zwischen den Molekülen (Van-der-Waals Kräfte)
→ geradlinige Bewegung mit konstanter Geschwindigkeit zwischen Zusammenstößen



3.2 Zustandsgleichung für ideale Gase

A Isobare Zustandsänderung ($p = \text{const.}$)

■ Empirische Bestimmung der Temperatur



- Beobachtung: das **Volumen** (idealer) Gase ist **proportional zur Temperatur** (wenn $p = \text{const.}$)
- Auf empirischem Weg gefundenes **Gesetz von Gay-Lussac**

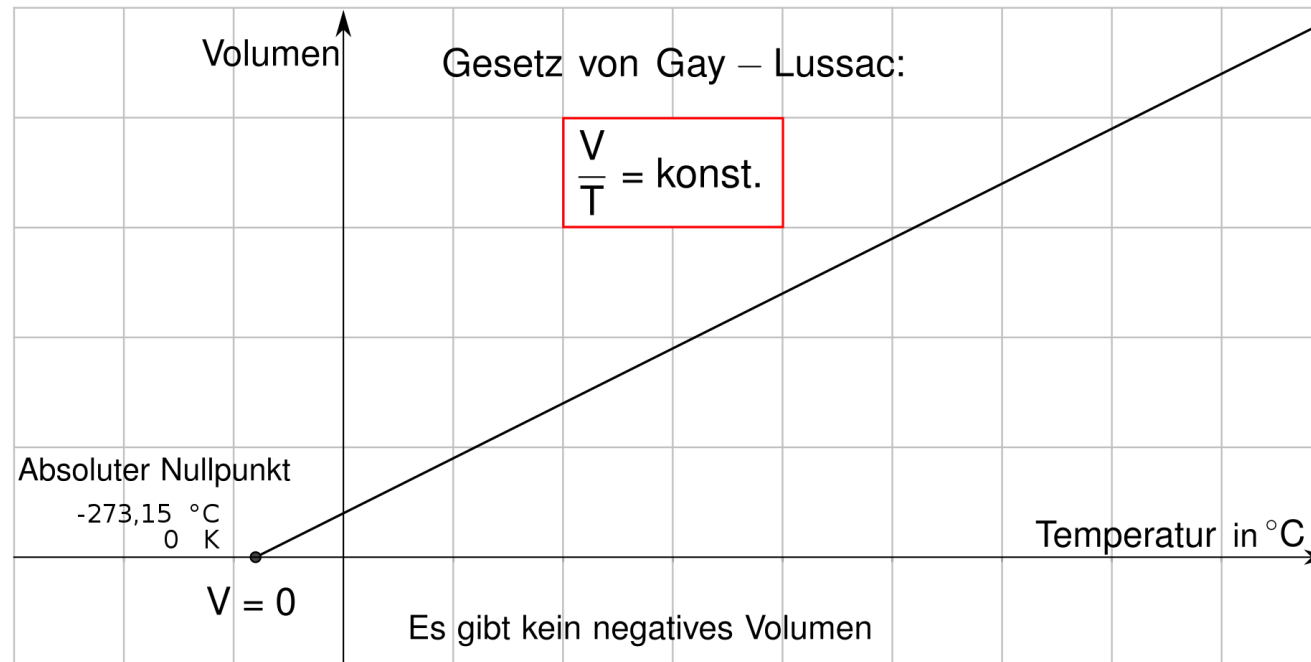
$$V \sim T$$

$$\frac{V}{T} = \frac{V_0}{T_0} = \text{const.} \quad \overset{\text{spezifisches Volumen}}{\frac{\alpha}{T} = \frac{\alpha_0}{T_0} = \text{const.}} \quad \text{wenn } p = \text{const.}$$

3.2 Zustandsgleichung für ideale Gase

A Isobare Zustandsänderung ($p = \text{const.}$)

■ Empirische Bestimmung der Temperatur: Gesetz von Gay-Lussac



$$\frac{V}{T} = \frac{V_0}{T_0} = \text{const.} \quad \frac{\alpha}{T} = \frac{\alpha_0}{T_0} = \text{const.} \quad \text{wenn } p = \text{const.}$$

3.2 Zustandsgleichung für ideale Gase

■ Joseph Louis Gay-Lussac

(1778-1850)

- franz. Chemiker und Physiker
- Gasmengenbestimmung bei Elektrolyse (zusammen mit Humboldt)
- Grundlagen für eine Vielzahl von später aufgestellten Gesetzmäßigkeiten, z. B:
 - Bestimmung absoluter Nullpunkt
 - Avogadrosches Gesetz
 - Joulsches Gesetz



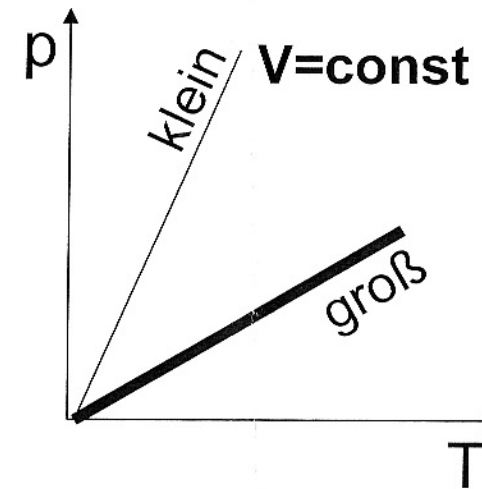
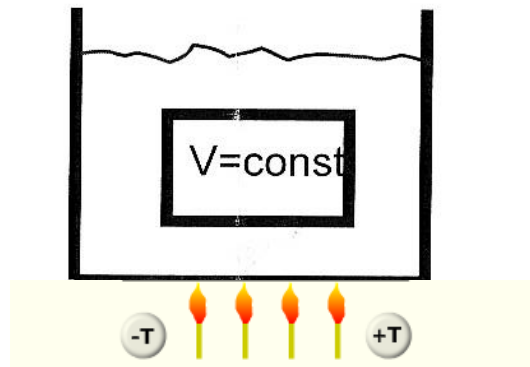
3.2 Zustandsgleichung für ideale Gase

B Isochore Zustandsänderung ($V = \text{const.}$)

- **Amontons-Gesetz** (analog zum Gesetz von Gay-Lussac): Druck p ist proportional zu Temperatur T , wenn der Volumen $V = \text{const.}$ ist

$$\frac{p}{T} = \frac{p_0}{T_0} = \text{const.} \quad \text{wenn } V = \text{const.}$$

$$p \sim T$$



3.2 Zustandsgleichung für ideale Gase

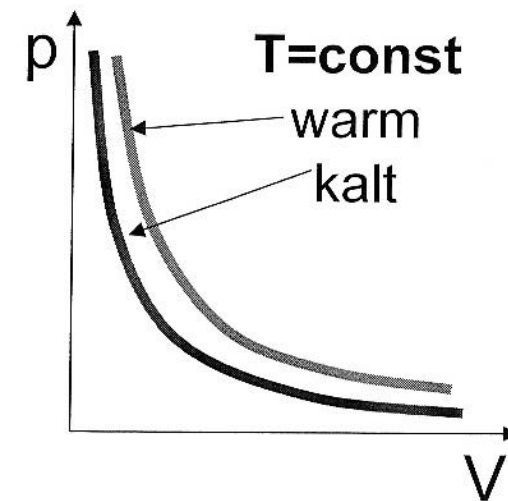
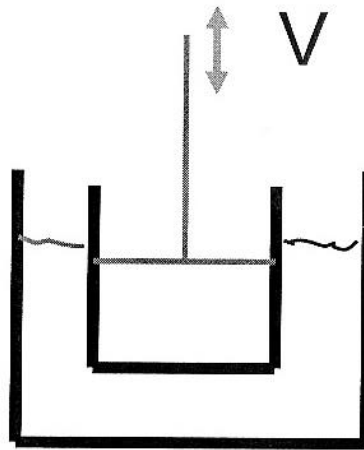
C Isotherme Zustandsänderung ($T = \text{const.}$)

- Gesetz von **Boyle-Mariotte**: Druck p ist proportional zum Volumen V , wenn die Temperatur $T = \text{const.}$ ist

$$pV = p_0 V_0 = \text{const.} \quad \text{wenn } T = \text{const.}$$

0 : konstant wählbar

$$p \sim V^{-1}$$



3.2 Zustandsgleichung für ideale Gase

C Isotherme Zustandsänderung ($T = \text{const.}$)

- Gesetz von **Boyle-Mariotte**: Druck p ist proportional zum Volumen V , wenn die Temperatur $T = \text{const.}$ ist

$$\begin{aligned} pV &= p_0V_0 = \text{const.} \\ p\alpha &= p_0\alpha_0 = \text{const.} \end{aligned} \quad \text{wenn } T = \text{const.}$$

$$\alpha = \frac{V}{m}$$

Edme Mariotte (1620 - 1684)
franz. Geistlicher + Physiker



Robert Boyle (1626-1691),
irischer Naturforscher

3.2 Zustandsgleichung für ideale Gase

Zustandsgleichung: Herleitung (eine von mehreren Möglichkeiten)

■ Boyle-Mariotte ($T = \text{const.}$) $p\alpha = p_0\alpha_0 = \text{const.}$

→ isotherme Zustandsänderung $p_1\alpha_1 = p_2\alpha_2$ mit $T_1 = T_2$ (1)

■ Gay-Lussac ($p = \text{const.}$) $\frac{\alpha}{T} = \frac{\alpha_0}{T_0} = \text{const.}$

→ isobare Zustandsänderung $\frac{\alpha_2}{T_2} = \frac{\alpha_3}{T_3}$ mit $p_2 = p_3$
 $\Leftrightarrow \alpha_2 = \frac{\alpha_3 T_2}{T_3}$ (2)

✕ (2) → (1): $p_1\alpha_1 = \frac{p_2\alpha_3 T_2}{T_3} = \frac{p_3\alpha_3 T_1}{T_3}$ da $T_1 = T_2$ und $p_2 = p_3$

$$\Rightarrow \frac{p_1\alpha_1}{T_1} = \frac{p_3\alpha_3}{T_3} = \frac{p_0\alpha_0}{T_0} = \text{const.} = R \Rightarrow p\alpha = RT \Leftrightarrow p = \rho RT$$

↑
individuelle Gaskonstante
(verschieden je nach Gas)

ρ : „rho“

Zustandsgleichung für ein ideales Gas
(Slang: ideale Gasgleichung 😊)

3.2 Zustandsgleichung für ideale Gase

■ Zustandsgleichung

- R: individuelle Gaskonstante
- abhängig von Gas
 - proportional zur Masse

$$p = \rho RT \Leftrightarrow pV = mRT$$

- Definition (stoffunabhängige) **universelle Gaskonstante** $R^* = R \cdot M = R \cdot \frac{m}{n} = 8,314 \text{ J Mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$
mit M = molare Masse, m = Masse, n = Anzahl Mole

- Allgemeine Zustandsgleichung:

$$pV = nR^*T$$

mit molarer Masse:

$$\Leftrightarrow pV = \frac{m}{M} R^* T$$

mit molarem Volumen: $V^* = \frac{V}{n} = 22,41 \text{ l mol}^{-1}$
(Satz von Avogadro für ideale Gase bei Normalbed.)

$$\Leftrightarrow pV^* = R^* T$$

→ nicht vollständig

kein Messgrößen für Luftdichte (kann nur berechnet werden)

3.3 Zustandsgleichung einer Mischung idealer Gase

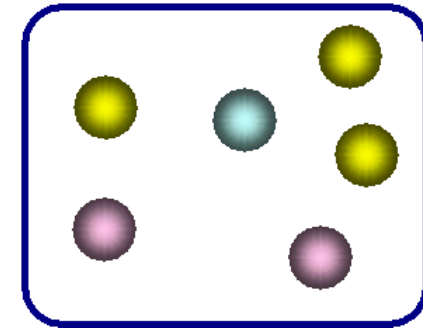
Gasgemisch: Betrachtung als Summe über alle i Komponenten

- Jedes Gas i ist überall im Volumen enthalten
- Das Gas i übt einen bestimmten Druck aus, den Partialdruck p_i
- **Daltonsches Gesetz:** Gesamtdruck p ist Summe der Partialdrücke p_i

$$p = \sum_i p_i$$

(für trockene Luft)

- Gasgemisch idealer Gase ist auch ein ideales Gas!
- Keine Wechselwirkung zwischen den Gasen!



John Dalton (1766-1844): engl. Naturforscher und Lehrer

3.3 Zustandsgleichung einer Mischung idealer Gase

Gasgemisch: Betrachtung als Summe über alle i Komponenten

Jedes Gas i in einem Volumen V hat die gleiche Temperatur T bei einem Partialdruck p_i (bei $V = \text{const.}$); dann folgt für die Zustandsgleichung

- Partialdruck Gas i

$$p_i = \frac{m_i}{M_i} \frac{T}{V} R^*$$

- beliebiges Gasgemisch

$$p = \frac{m}{M} \frac{T}{V} R^*$$

- Verhältnis Gas i zu Gasgemisch

$$\frac{p_i}{p} = \frac{m_i}{m} \frac{M}{M_i} = \frac{n_i}{n}$$

M = molare Masse, m = Masse, n = Anzahl Mole

3.3 Zustandsgleichung einer Mischung idealer Gase

$$p_i = \frac{m_i}{M_i} \frac{T}{V} R^*$$

Gasgemisch: Betrachtung als Summe über alle i Komponenten

■ Gasgemisch:
$$V (p_1 + p_2 + p_3 + \dots) = \left(\frac{m_1}{M_1} + \frac{m_2}{M_2} + \frac{m_3}{M_3} + \dots \right) R^* T$$

– daraus ergibt sich
$$\Leftrightarrow V \sum p_i = pV = \sum \frac{m_i}{M_i} R^* T$$

mit Gesamtmasse

und mittlerer molarer Masse
(x_i = Volumenanteil)

$$\left. \begin{aligned} m &= \sum_i m_i \\ \bar{M} &= \sum x_i M_i \end{aligned} \right\} pV = \frac{m}{\bar{M}} R^* T$$

■ Für **trockene Luft** mit individueller Gaskonstante R_l

$$R_l = \frac{R^*}{M_l} = \frac{8,314}{0,02896} \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1} = 287,15 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$$

$$pV = m R_l T \Leftrightarrow p = \rho R_l T$$

für **feuchte Luft**: siehe Kapitel 5.1 (VL 7)

3.4 Meteorologische Größen: Wind



EF4 Tornado März 2022, Iowa



Atlantische Wirbestürme (Hurrikan) 2022



Schwergewitter Frankreich, 25.,10.2022



Framersheim, 7. Juli 2015



Kyrill, 18. Jan. 2007

Fragen über Fragen...

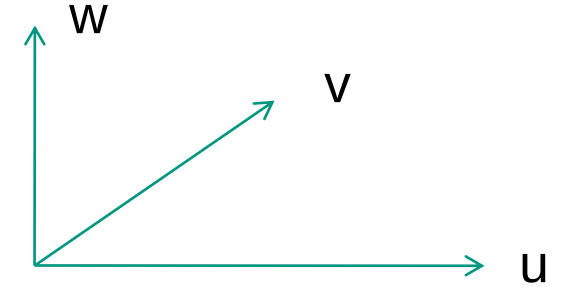
- Was war der bisher **tiefste beobachtete Luftdruck auf Meeresniveau**? Bei welchem **Wettersystem**?
870 hPa (unter 900 sehr selten) 1979 tropischer Wirbelsturm
- Wo liegt die physikalische Obergrenze für die **Windgeschwindigkeit**? Was war die höchste je gemessene horiz. Windgeschwindigkeit? *Schallgeschwindigkeit*
480 $\frac{\text{km}}{\text{h}}$ (Tornado 1993, Oklahoma)
- Wie hoch ist der mittlere **Jahresniederschlag** von Karlsruhe?
770[?] mm (1980-2010)

3.4 Wind

Vertikal: $200 \frac{\text{km}}{\text{a}}$ max. gemessen
Tornado max 1 km Ausdehnung (Dauer wenig s, max $\frac{1}{2}$ h)
Hurricane bis 2 Wochen

■ Dreidimensionaler **Vektor**: $\vec{v} = u\vec{i} + v\vec{j} + w\vec{k}$

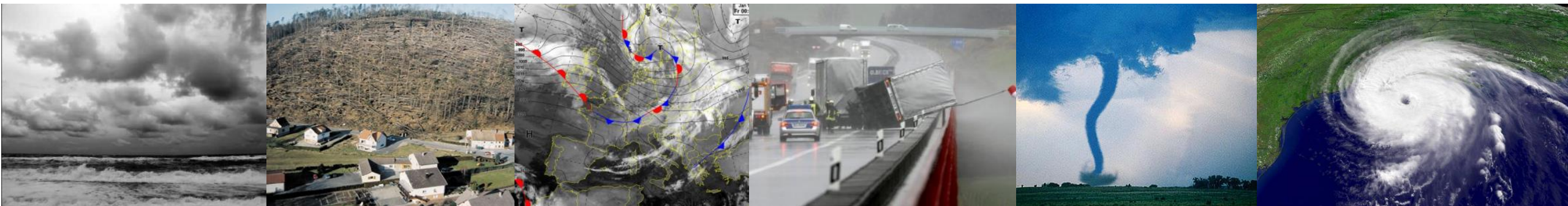
■ bei **mittleren Verhältnissen** ist $w \ll u, v$ $U \sim 10 \text{ m s}^{-1}$, $w \sim 10 \text{ cm s}^{-1}$
Aber: Vertikalkomponente wichtig für Entwicklung Wettersysteme
(Wolken, Niederschlag); extreme Vertikalgeschw. in Gewittern



■ Anzugeben: **Betrag** $|\vec{v}_h| = \sqrt{u^2 + v^2}$ und **Richtung** β (oder Vektor)

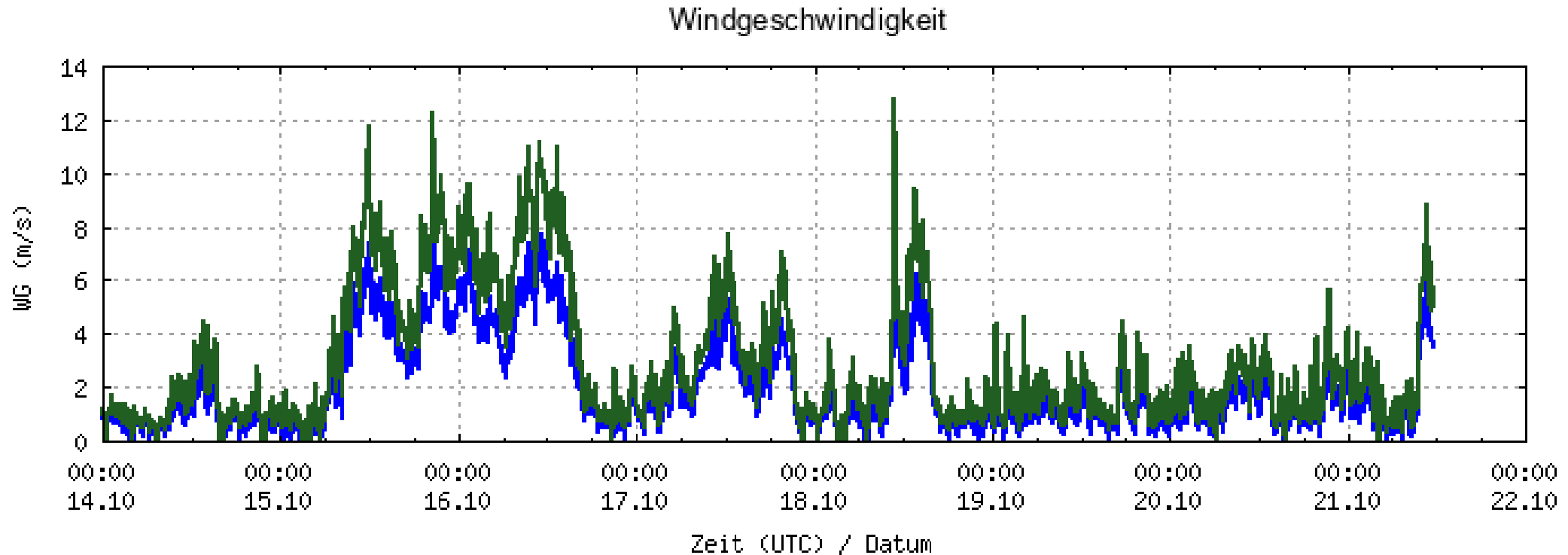
→ in Meteorologie üblich: Angabe der Richtung, aus der der Wind kommt,
z.B. SW bedeutet Strömung von Südwest nach Nordost gerichtet

■ Mittlerer Wind (üblich: 10 min Mittel) vs. Böengeschwindigkeit (~ s und weniger); Bögkeit
(= Turbulenz) abhängig von Stabilität



3.4 Wind

- Windgeschwindigkeit: mittlerer Wind (10-min) vs Böen (s)
- Schadenrelevant bei Stürmen: Böen; Schaden $\sim v^3$



SV2: Aktualisiert um 12:11 Uhr (UTC), 21.10.2019

10min-Mittel — Windspitzen
(Böen)

IMK-Station Rheinstetten 14.-22.10.2019

3.4 Wind

Einheiten der Windgeschwindigkeit

- SI-System: Meter/Sekunde, m s^{-1}
- gebräuchlich: km h^{-1}
 - $1 \text{ m s}^{-1} = 3,6 \text{ km h}^{-1}$
 - (einfache Umrechnung: $X \text{ m s}^{-1} \times 4 - 10\% = Y \text{ km h}^{-1}$)
$$\begin{array}{l} 20 \frac{\text{m}}{\text{s}} \hat{=} 72 \frac{\text{km}}{\text{h}} \\ (\cdot 4 = 80, -10\% = -8) \end{array}$$
- See- und Luftfahrt: Knoten (kn)
- $1 \text{ kn} = 1 \text{ Seemeile/Stunde} = 1.858 \text{ km h}^{-1} \approx 0,5 \text{ m s}^{-1}$
 - Faustformel: $1 \text{ kn} \approx 2 \text{ km h}^{-1} \approx 0,5 \text{ m s}^{-1}$

3.4 Wind

Windgeschwindigkeit: Einteilung nach Beaufortskala (F. Beaufort, 1806)

Stärke	Bezeichnung	Mittlere Windgeschw. in ca.10 m Höhe über offenem, flachem Gelände			Auswirkungen des Windes im Binnenland
		kn	m/s	km/h	
0	Windstille	0 – 1	0 – 0,2	0 - 1	Rauch steigt senkrecht auf
1	leiser Zug	1 – 3	0,3 – 1,5	1 – 5	Windrichtung angezeigt durch den Zug des Rauches
2	leichte Brise	4 – 6	1,6 – 3,3	6 – 11	Wind im Gesicht spürbar, Blätter und Windfahnen bewegen sich
3	schwache Brise schwacher Wind	7 – 10	3,4 – 5,4	12– 19	Wind bewegt dünne Zweige und strecktWimpel
4	mäßige Brise mäßiger Wind	11 – 15	5,5 – 7,9	20 – 28	Wind bewegt Zweige und dünnere Äste,hebt Staub und loses Papier
5	frische Brise frischer Wind	16 – 21	8 – 10,7	29 – 38	kleine Laubbäume beginnen zu schwanken, Schaumkronen bilden sich auf See
6	starker Wind	22 – 27	10,8 – 13,8	39 – 49	starke Äste schwanken, Regenschirme sind nur schwer zu halten, Telegrafleitungen pfeifen im Wind

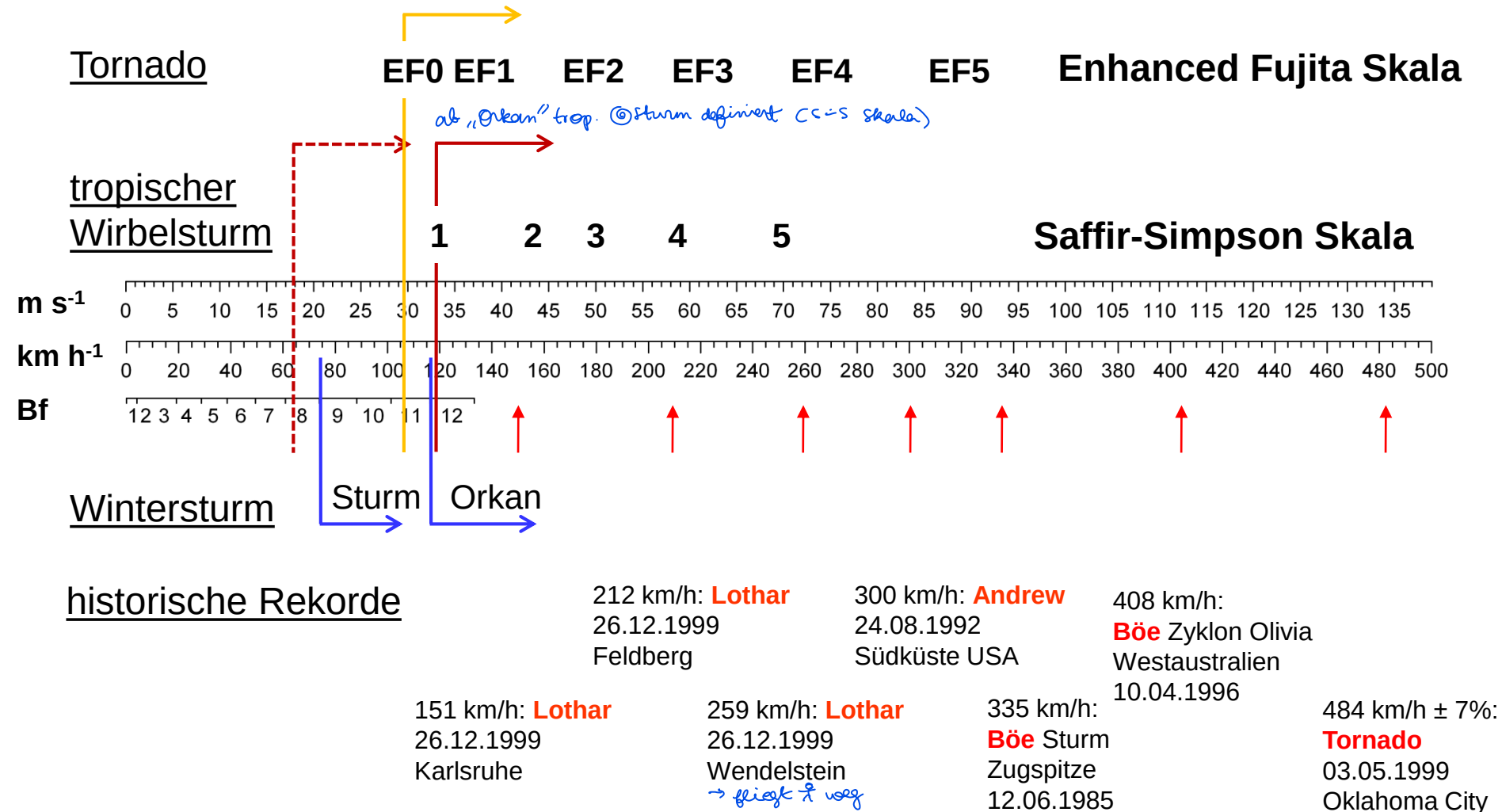
3.4 Wind

Windgeschwindigkeit: Einteilung nach Beaufortskala (F. Beaufort, 1806)

Stärke	Bezeichnung	Mittlere Windgeschw. in ca.10 m Höhe über offenem, flachem Gelände			Auswirkungen des Windes im Binnenland
		kn	m/s	km/h	
7	steifer Wind	28 – 33	13,9 – 17,1	50 – 61	fühlbare Hemmungen beim Gehen gegen den Wind, ganze Bäume bewegen sich
8	stürmische Wind	34 – 40	17,2 – 20,7	62 – 75	Zweige brechen von Bäumen, erschwert erheblich das Gehen im Freien
9	Sturm	41 – 47	20,8 – 24,4	75 – 88	Äste brechen von Bäumen, kleinere Schäden an Häusern (Dachziegel oder Rauchhauben abgehoben)
10	schwerer Sturm	48 – 55	24,5 – 28,4	89 – 102	Wind bricht Bäume, größere Schäden an Häusern
11	orkanartiger Sturm	56 – 63	28,5 – 32,6	103 – 117	Wind entwurzelt Bäume, verbreitet Sturmschäden
12	Orkan	> 64	> 32,7	> 118	schwere Verwüstungen

3.4 Wind

Skalen der Windgeschwindigkeiten, historische Rekorde



Wir fassen zusammen...

- Kinetische Gastheorie: Temperatur ist **mittlere kinetische Energie** der Moleküle $T = \frac{m\overline{v^2}}{3k}$
- Ideales Gas: ausdehnungslose Massepunkte; hochverdünnt; keine Van-der-Waals Kräfte
- Einheiten Temperatur: °C, °F, K
- Gesetz von **Gay-Lussac** für $p = \text{const.}$ $\frac{V}{T} = \frac{V_0}{T_0} = \text{const.}$
- Gesetz von **Amontons** für $V = \text{const.}$ $\frac{p}{T} = \frac{p_0}{T_0} = \text{const.}$
- **Boyle-Mariotte** für $T = \text{const.}$ $p\alpha = p_0\alpha_0 = \text{const.}$
- **Zustandsgleichung** für ein ideales Gas $p = \rho RT \Leftrightarrow pV = mRT \quad \left| = \frac{m}{M} R^* T \right.$
- Zustandsgleichung für ein Gasgemisch (trockene Luft) $p = \rho R_l T \quad R_l = 287,15 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$
- **Wind**: dreidimensional; mittlerer Wind vs. Böen; $\text{m/s} = 3,6 \text{ km/h} \approx 2 \text{ kn}$
- **Skalen**: Beaufort-Skala (Bf1-12); Saffir-Simpson-Skala (1-5) für tropische Wirbelstürme (Kat 1 $\geq 119 \text{ km/h}$); (Enhanced) Fujita Skala (0-5) für Tornados