



Wind

KIT Karlsruhe





EIFER

Überblick

- Definitionen
- Atmosphäre
- Globales Windsystem
- Lokale Windsysteme
- Höhenprofile
- Windmessung
- Windatlanten
- Simulationen
- Geschwindigkeiten



Definitionen

Wetter, Witterung, Klima

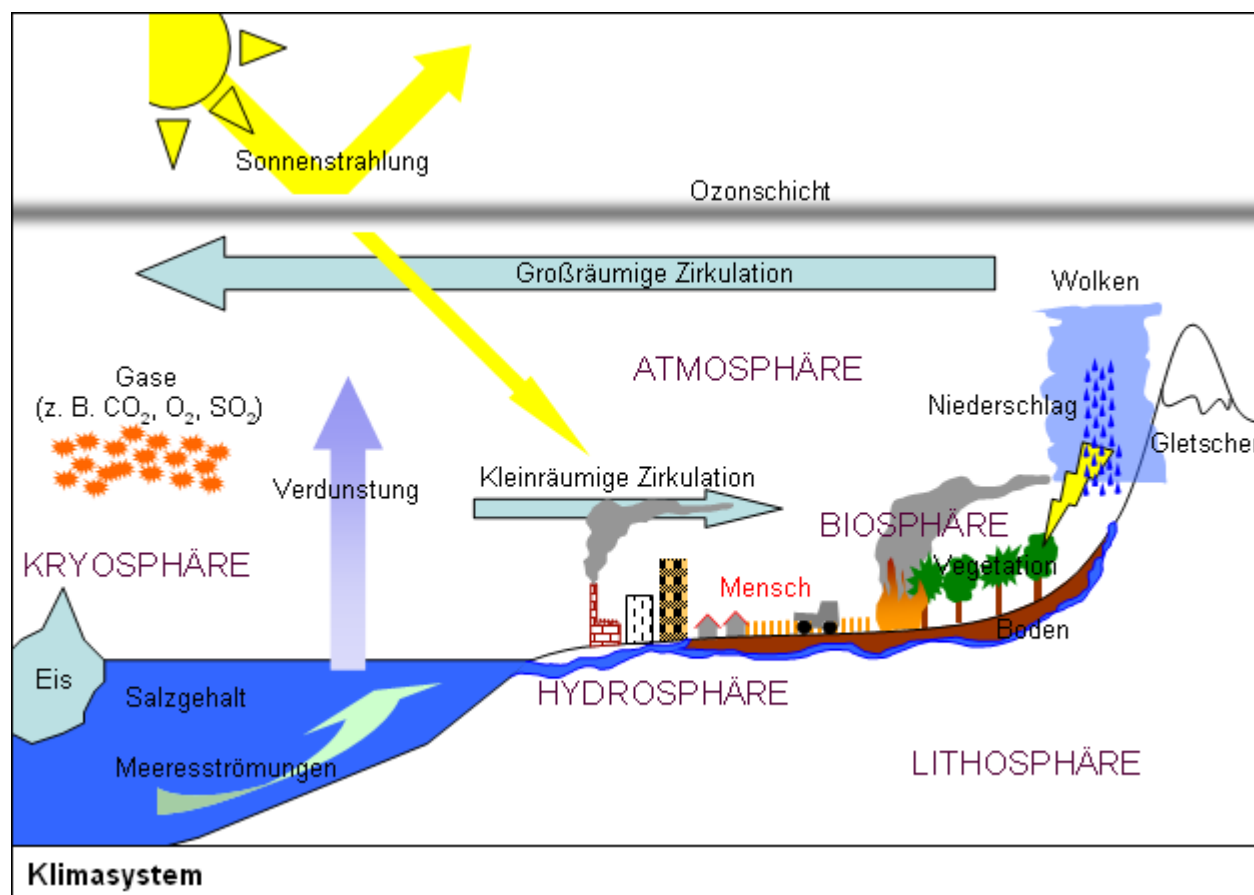
- **Wetter**
 - Momentaner Zustand der Atmosphäre (1h-1d)
- ***Witterung***
 - Charakter des Wetter über mittleren Zeitraum (Woche/Jahreszeit)
- **Klima**
 - Mittlerer Zustand der Atmosphäre über längeren Zeitraum (10a+)



Definitionen

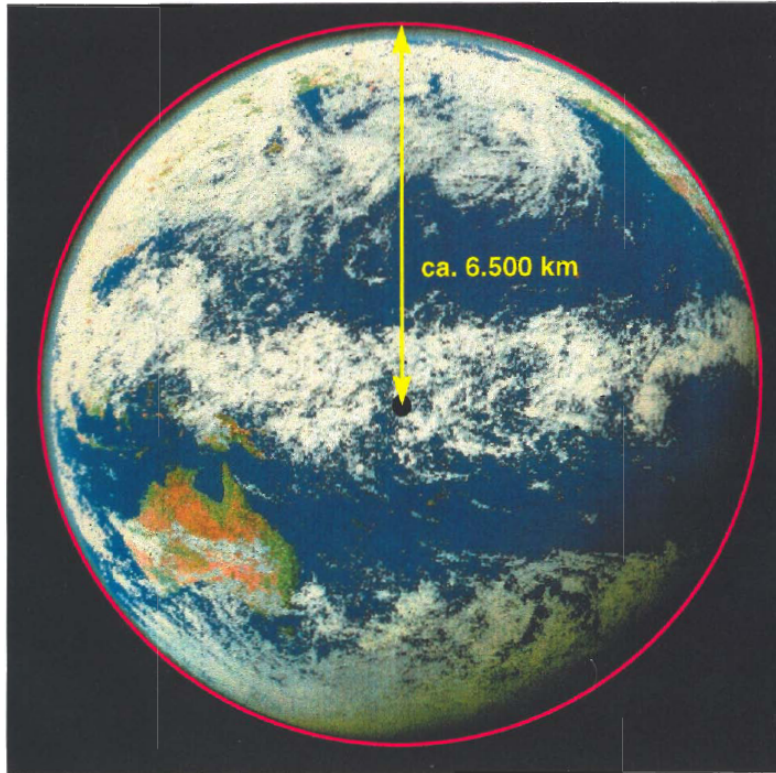
Klima - Skalen

- Makroklima (Großklima)
 - Klimaregionen der Erde
- Mesoklima (Regional-/Lokalklima)
 - z.B. Mittelmeerraum,
 - z.B. Insel, großes Tal wie Rheinebene
- Mikroklima (Engräumiges Kleinklima)
 - Wald, Stadt, enges Tal

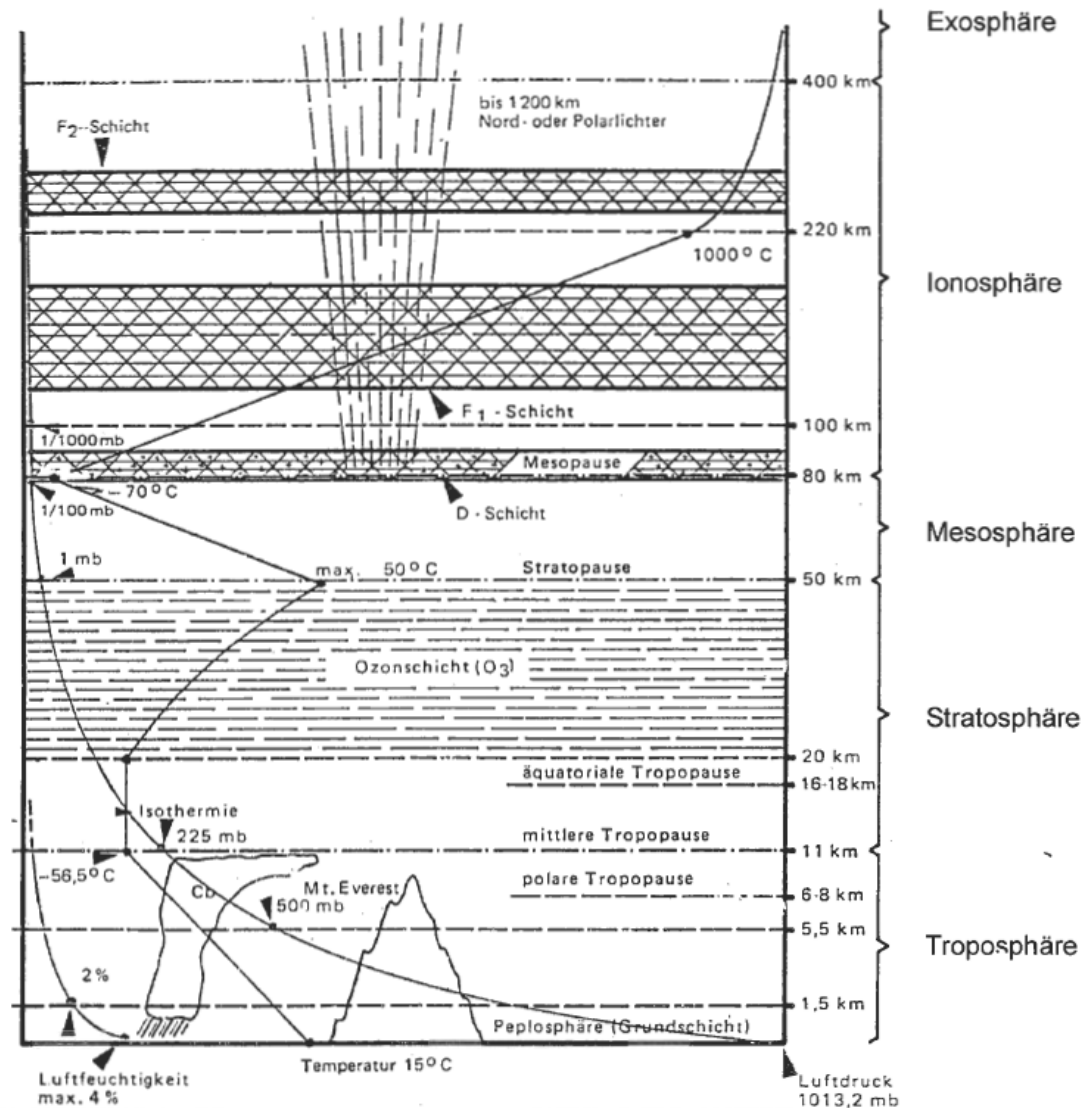




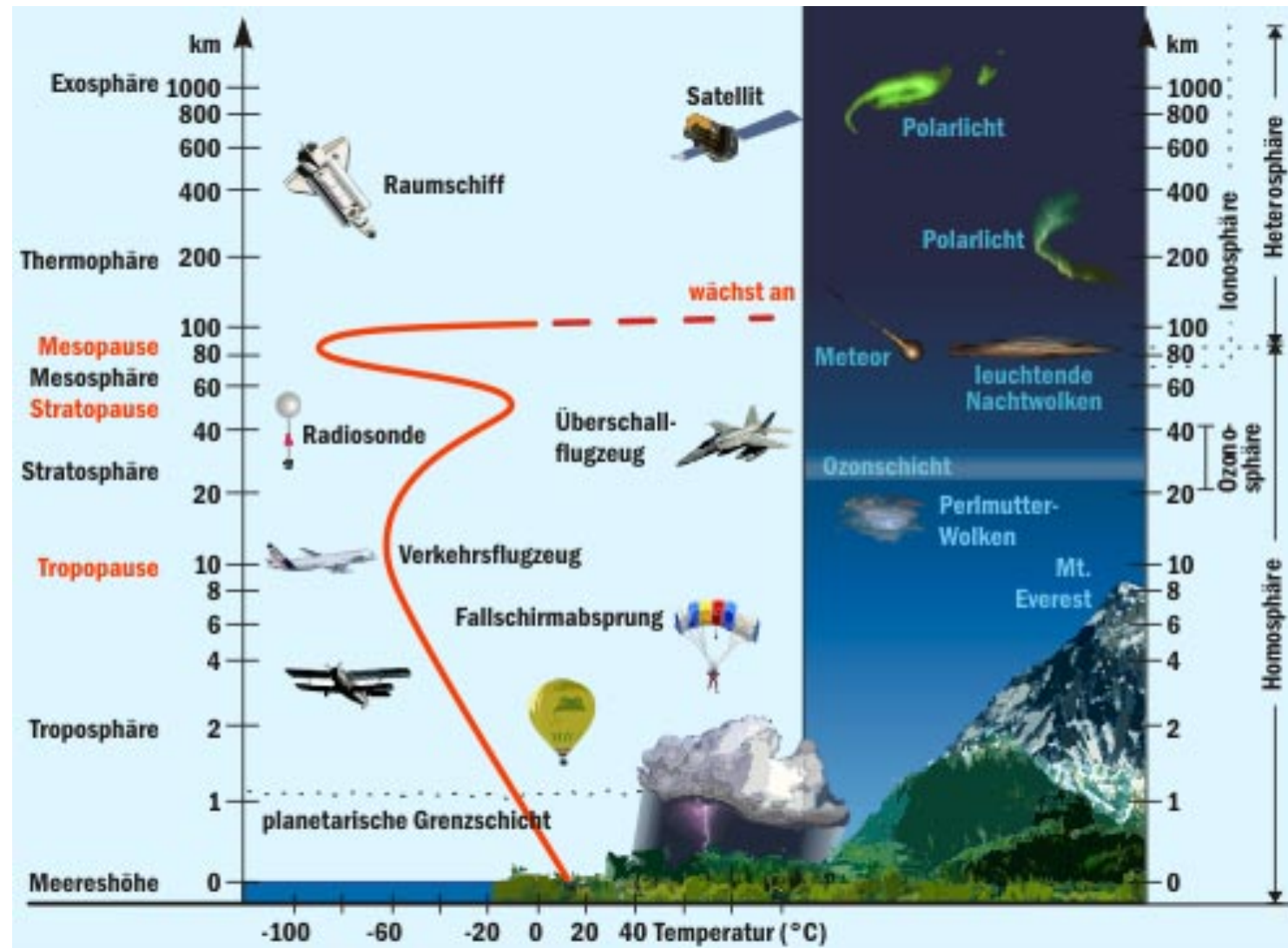
Die Atmosphäre



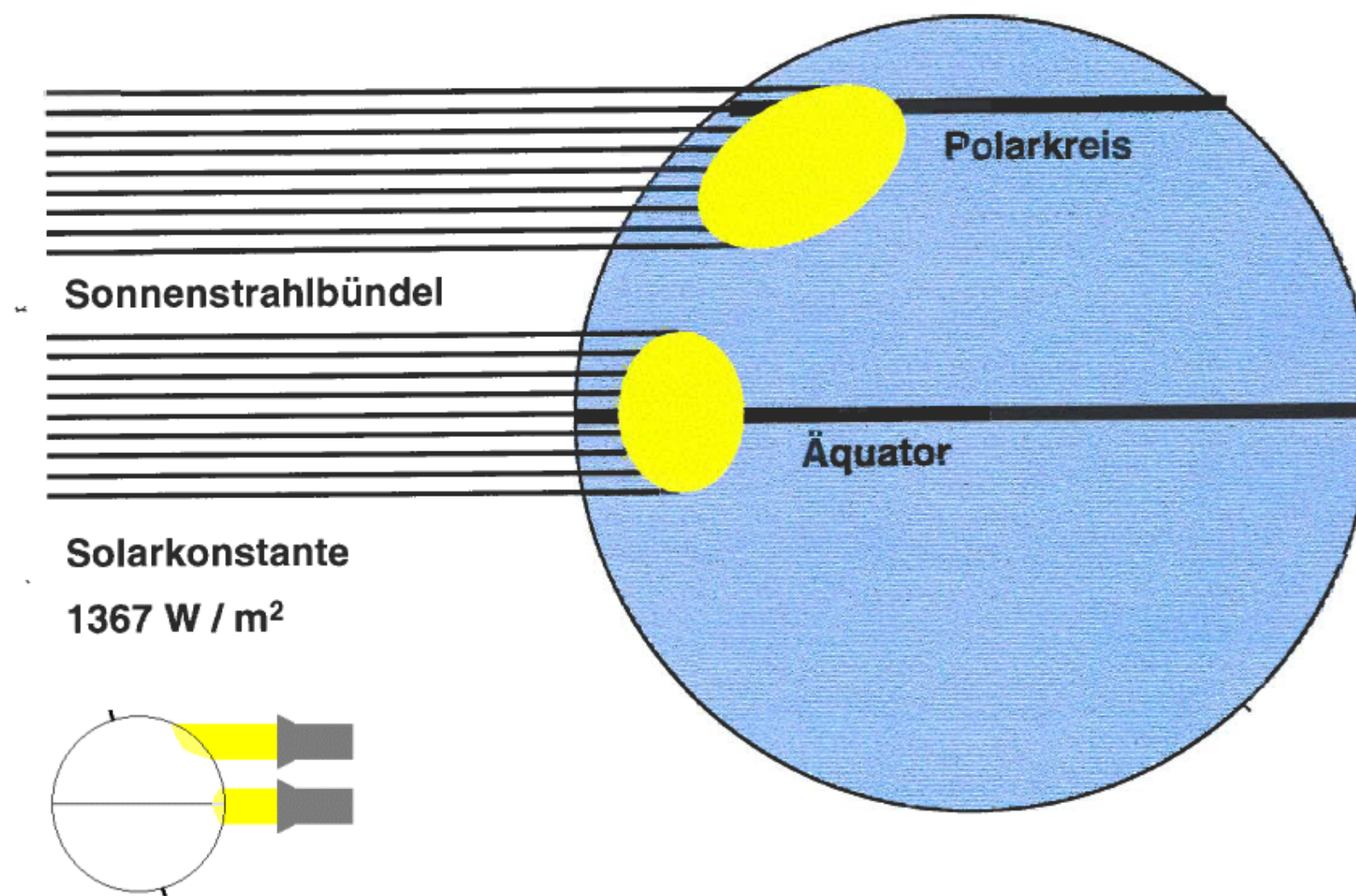
Die Schichten der Atmosphäre



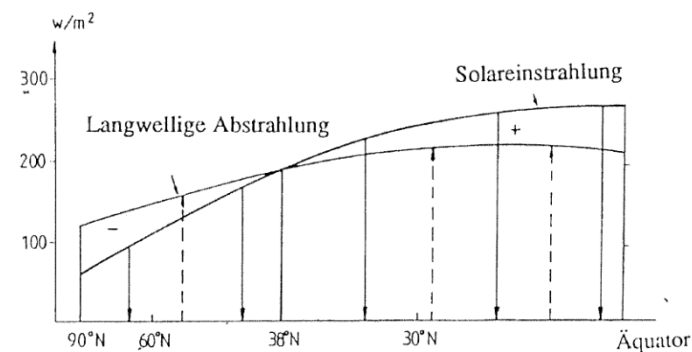
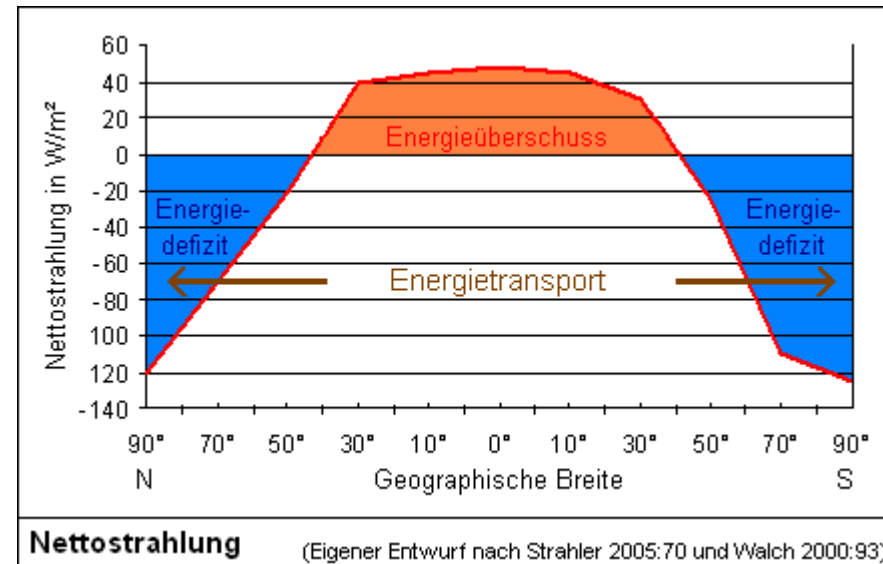
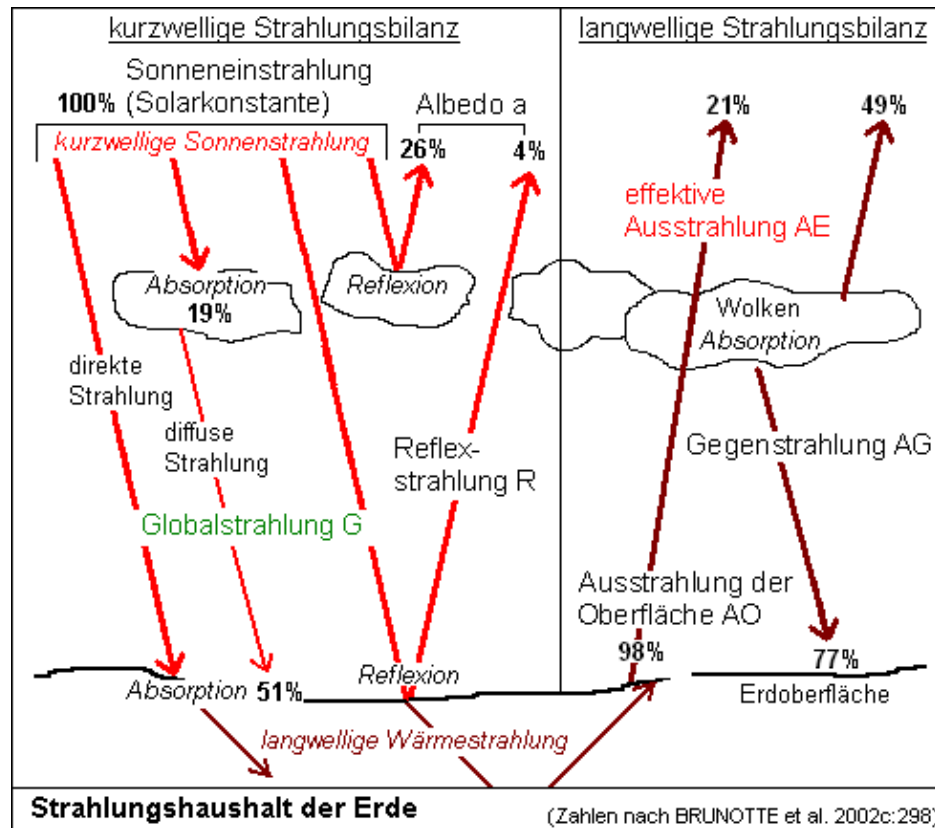
Die atmosphärische Schichtung



Unterschiedliche Einstrahlung



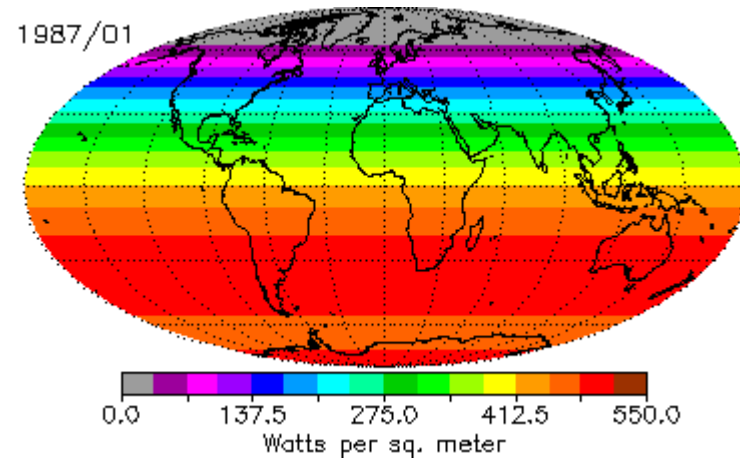
Strahlungsbilanz der Erde





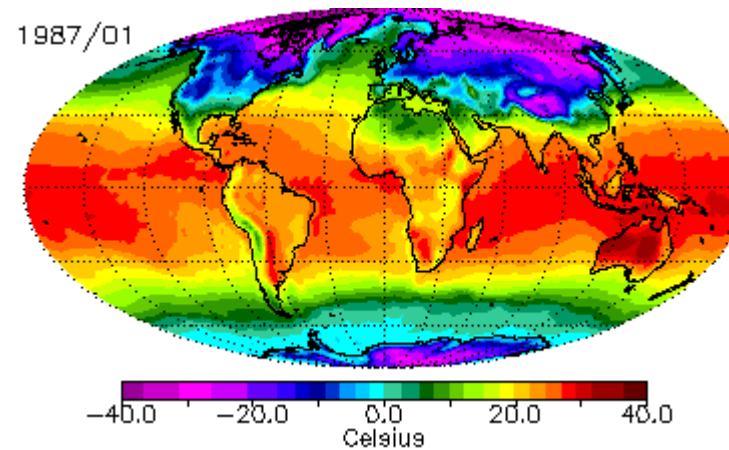
Strahlungsbilanz

Einstrahlung & Erwärmung



Einstrahlung

Erwärmung



Eigenschaften der Luft

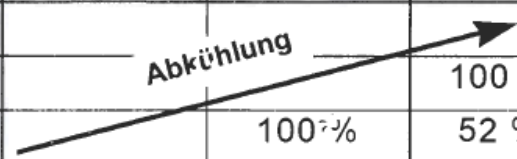
Dichte der Luft bei verschiedenen Temperaturen
und einem Druck von 1013 mbar :

Temperatur	Dichte
0°C	1293 g/m ³
10°C	1247 g/m ³
20°C	1205 g/m ³

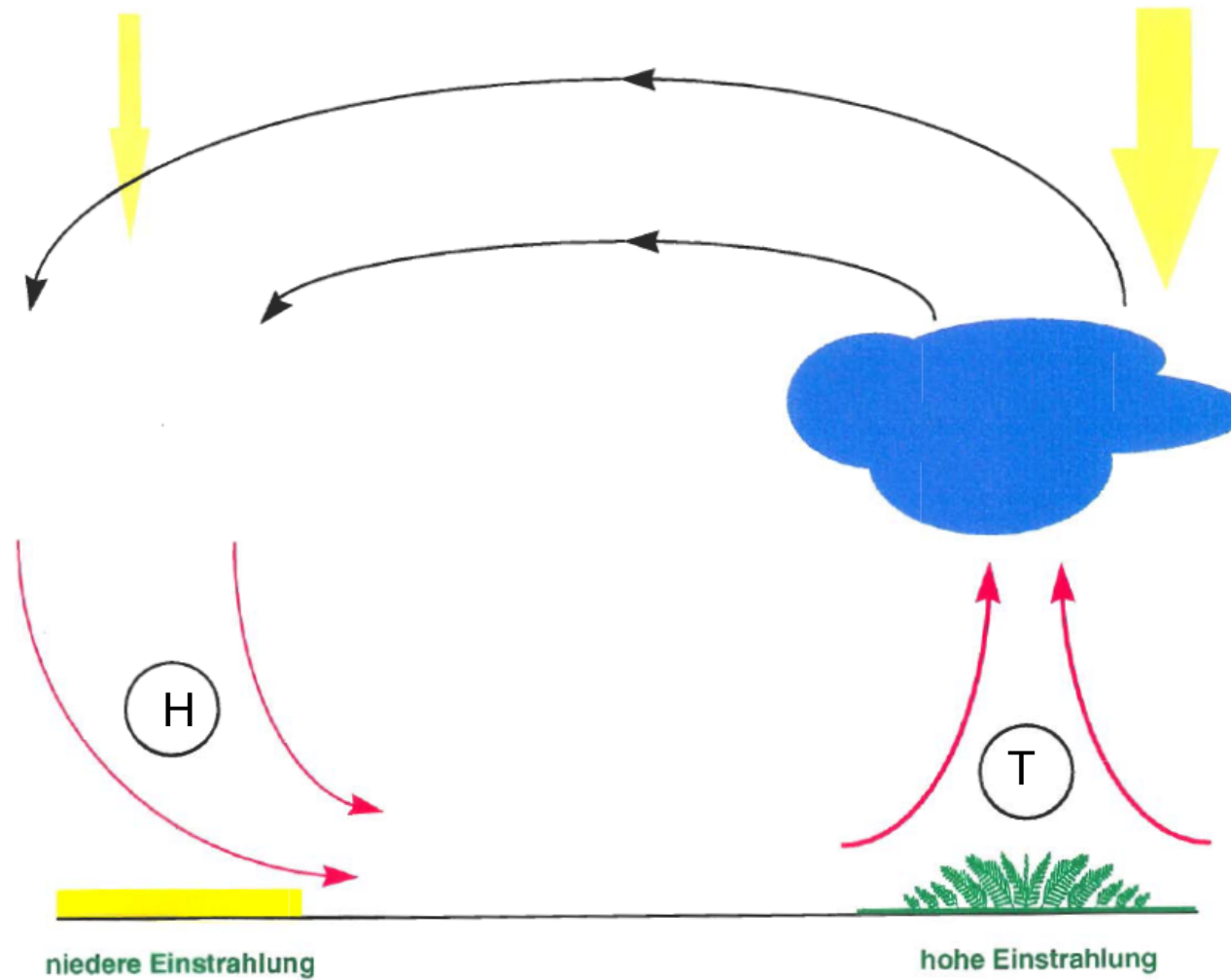
Wasserdampfgehalt der Luft bei verschiedenen
relativen Feuchtigkeiten und Temperaturen:

Dampfgehalt	30,4 g/m ³	17,2 g/m ³	9,4 g/m ³	4,9 g/m ³
Temperatur				
0° C				100 %
10° C			100 %	50 %
20° C		100 %	52 %	26 %
30° C	100 %	55 %	29 %	14 %

Abkühlung



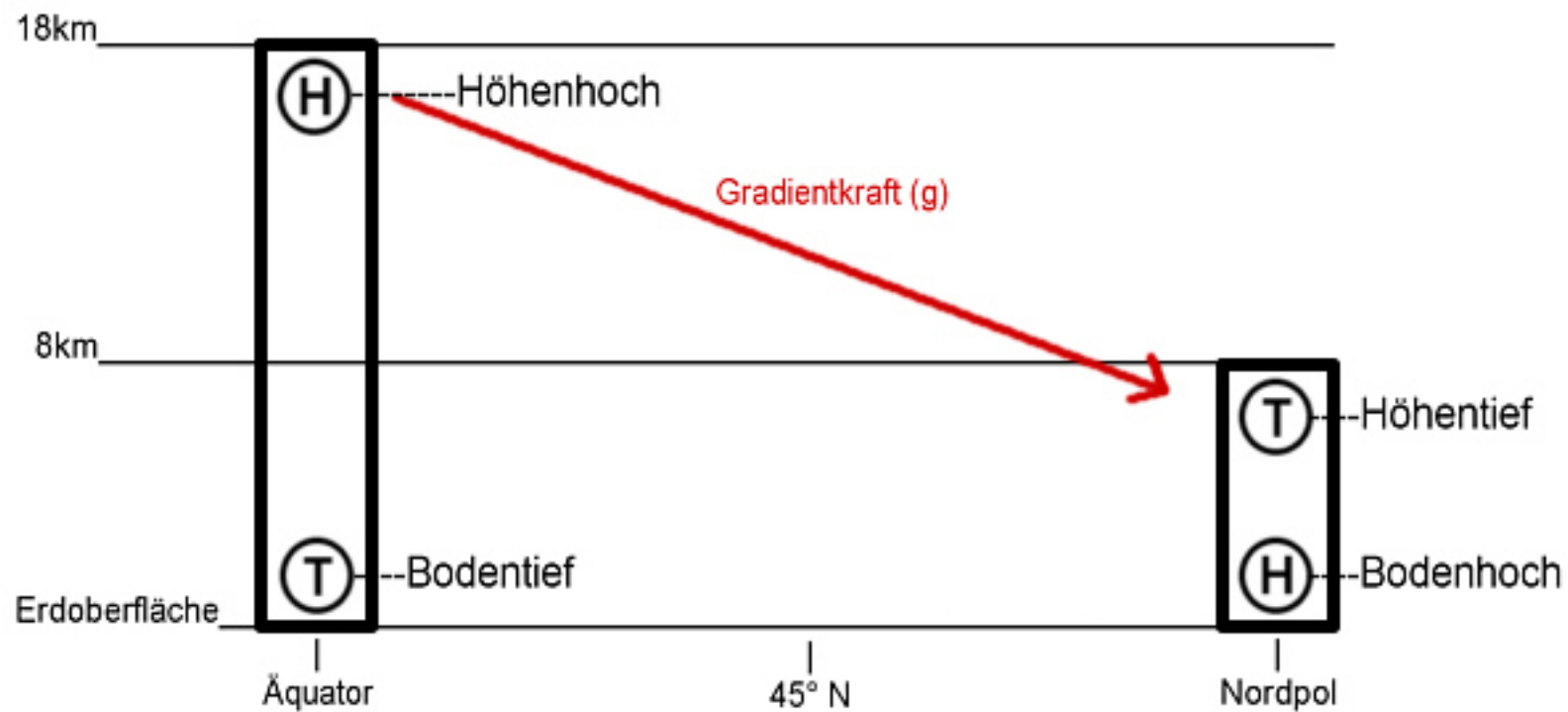
Einstrahlungsbedingte Zirkulation





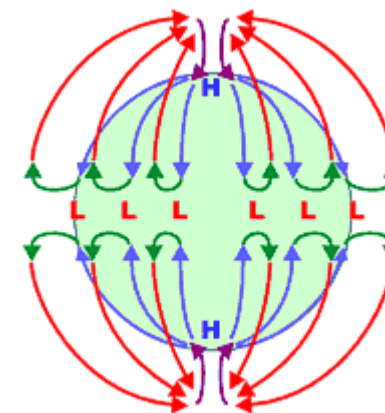
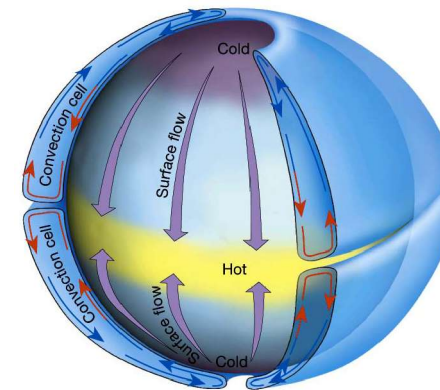
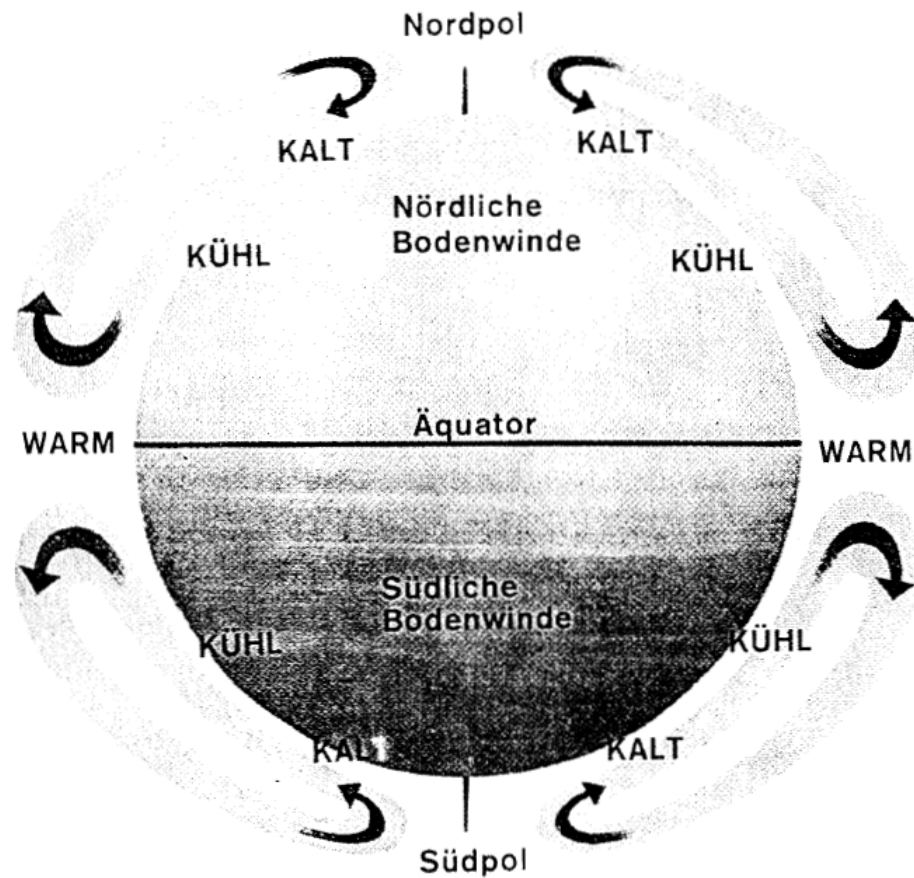
EIFER

Wind als Gradientenkraft

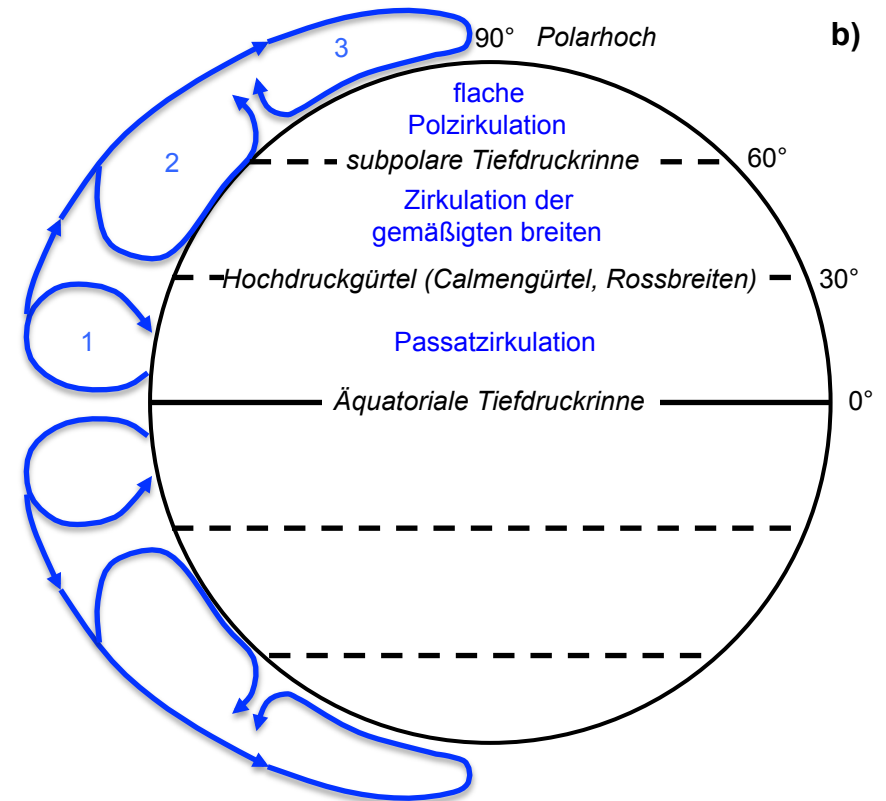
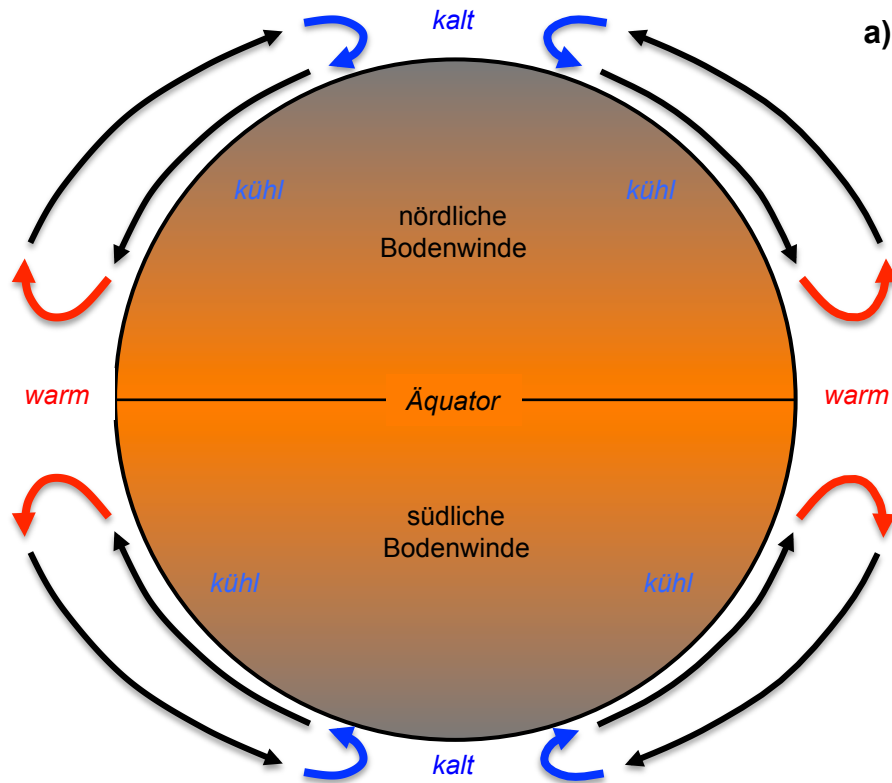




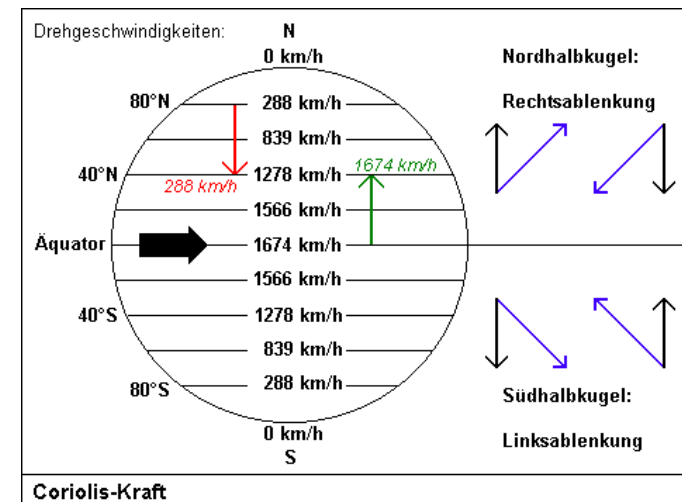
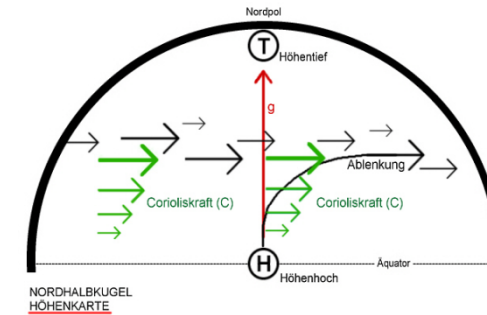
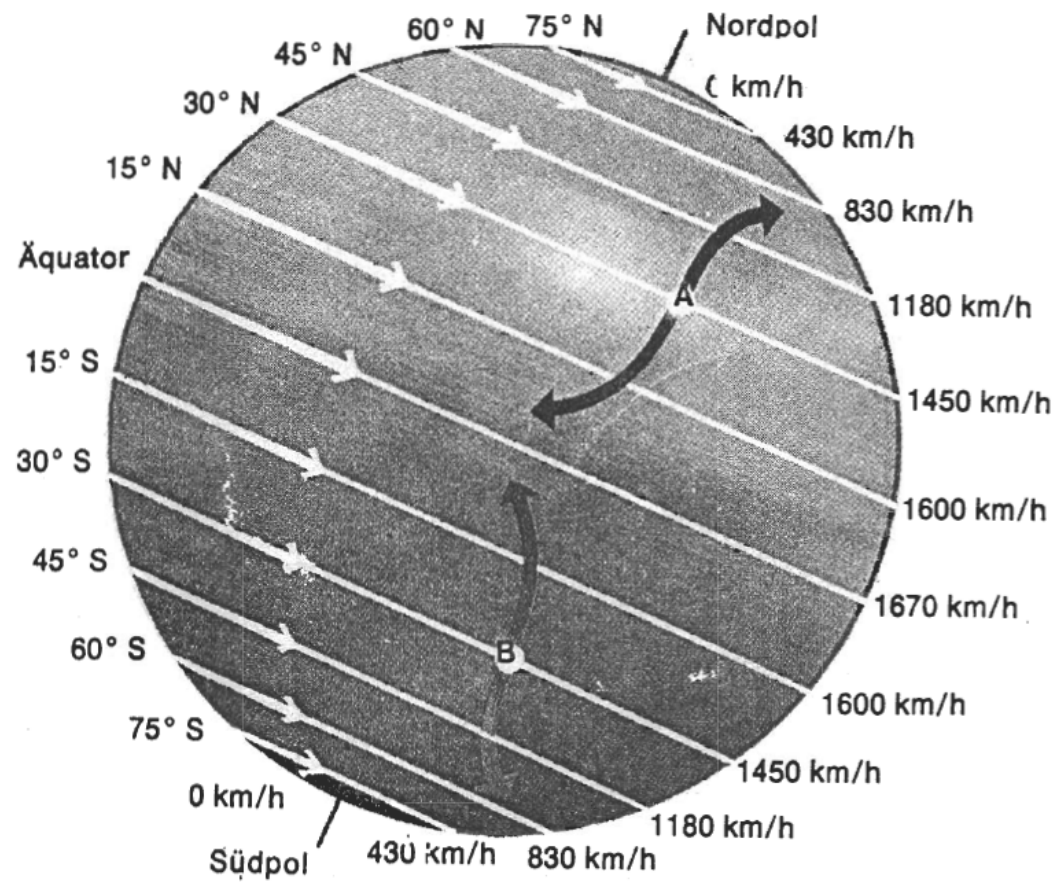
Vereinfachte Globalströmung



Globale Windzonen



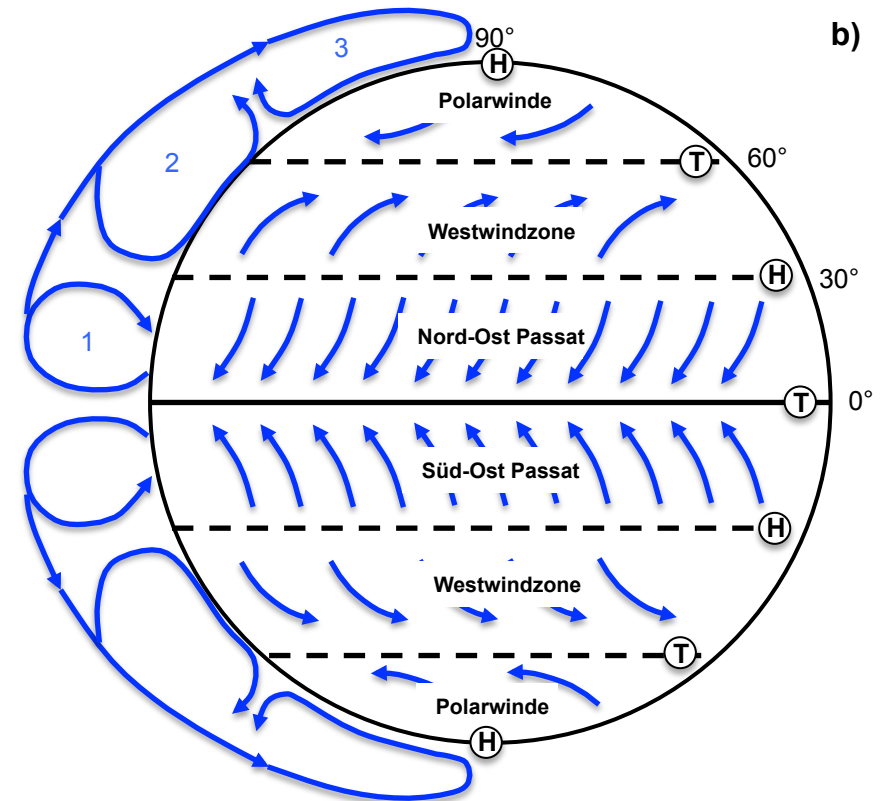
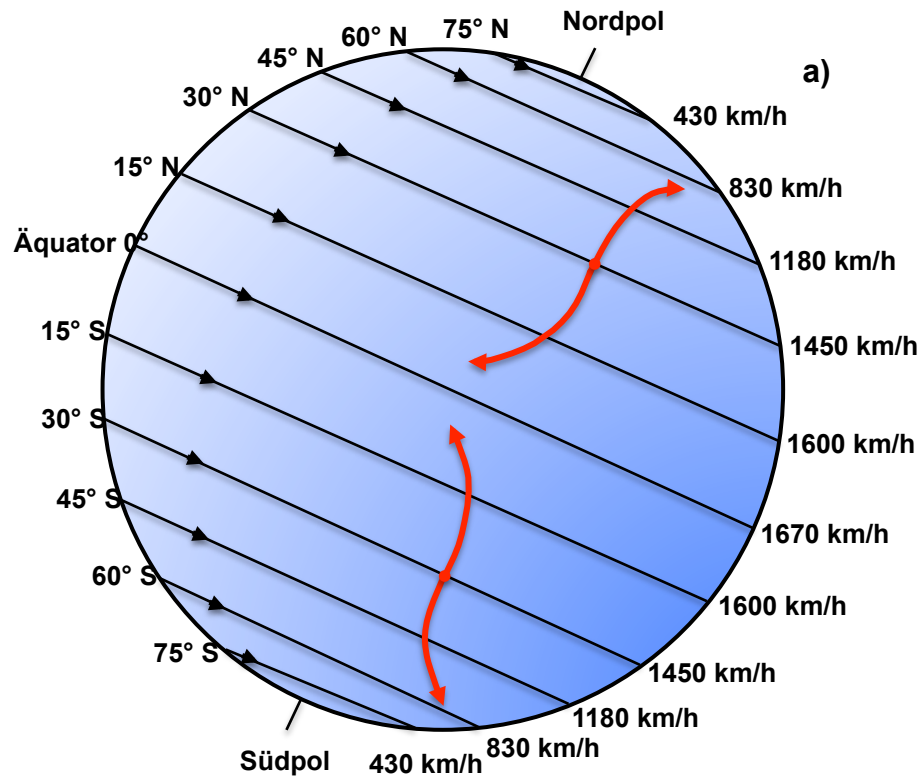
Corioliskraft



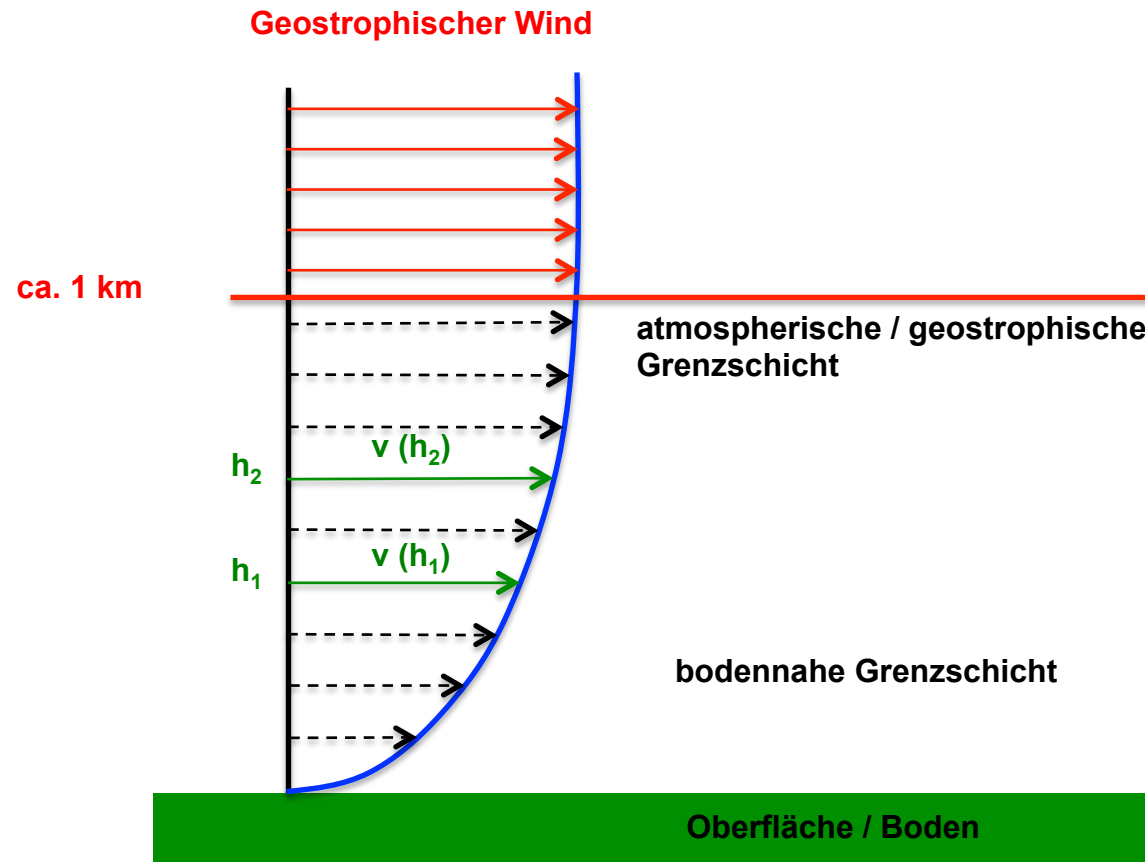
Globale Wind- & Klimazonen



Globale Winde und Corioliskraft



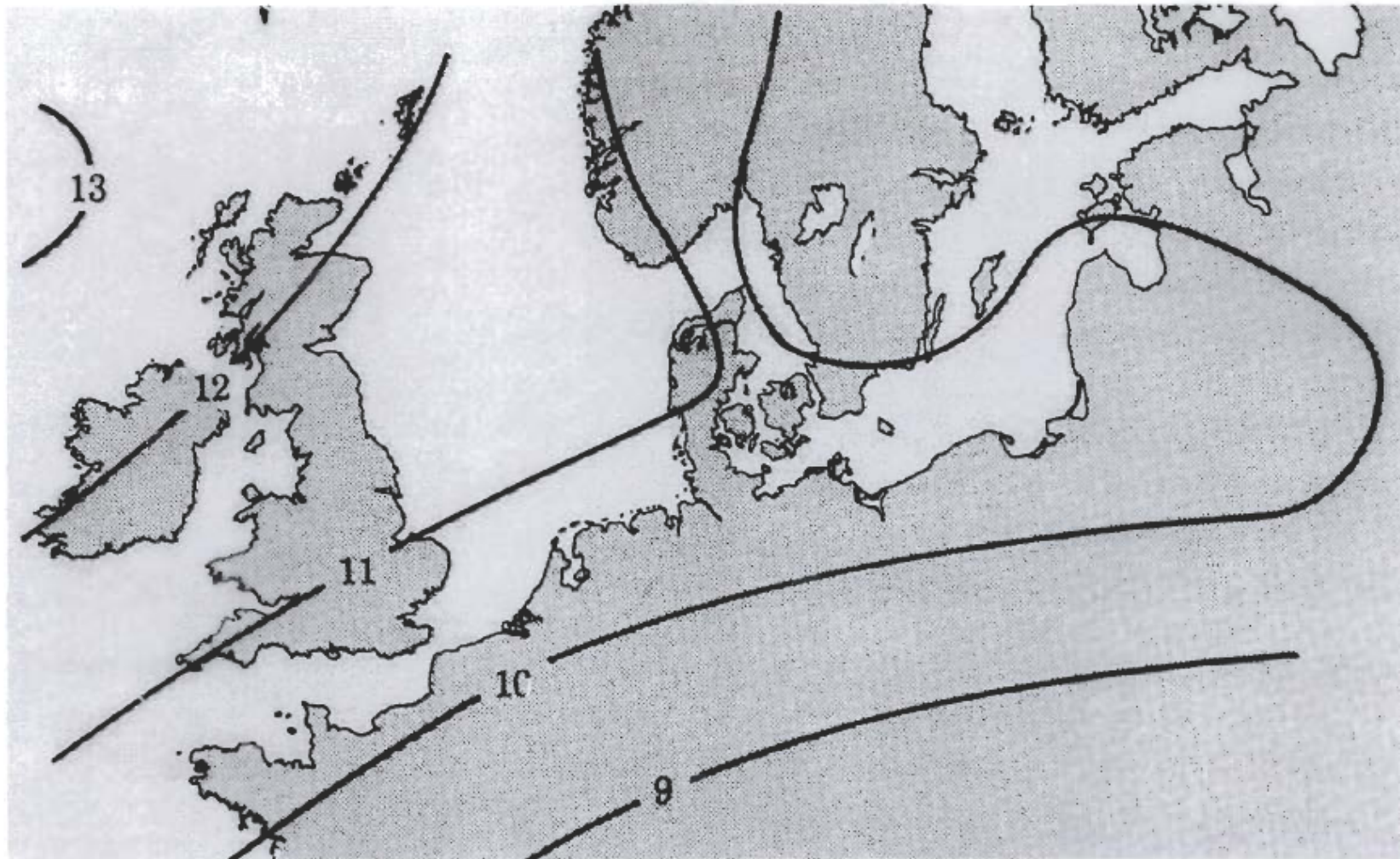
Geostrophischer Wind





EIFER

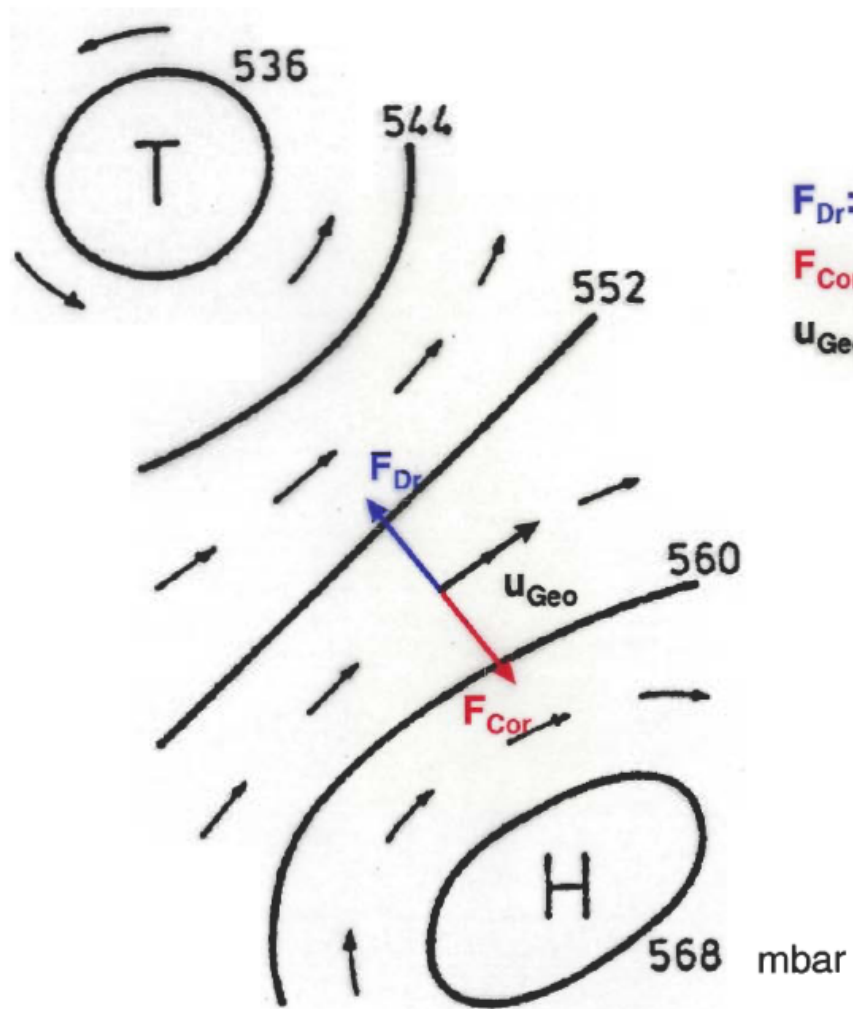
Geostrophische Winde Nordeuropa





EIFER

Hoch-Tiefdruck geostrophisch



F_{Dr} : Druckgradientenkraft

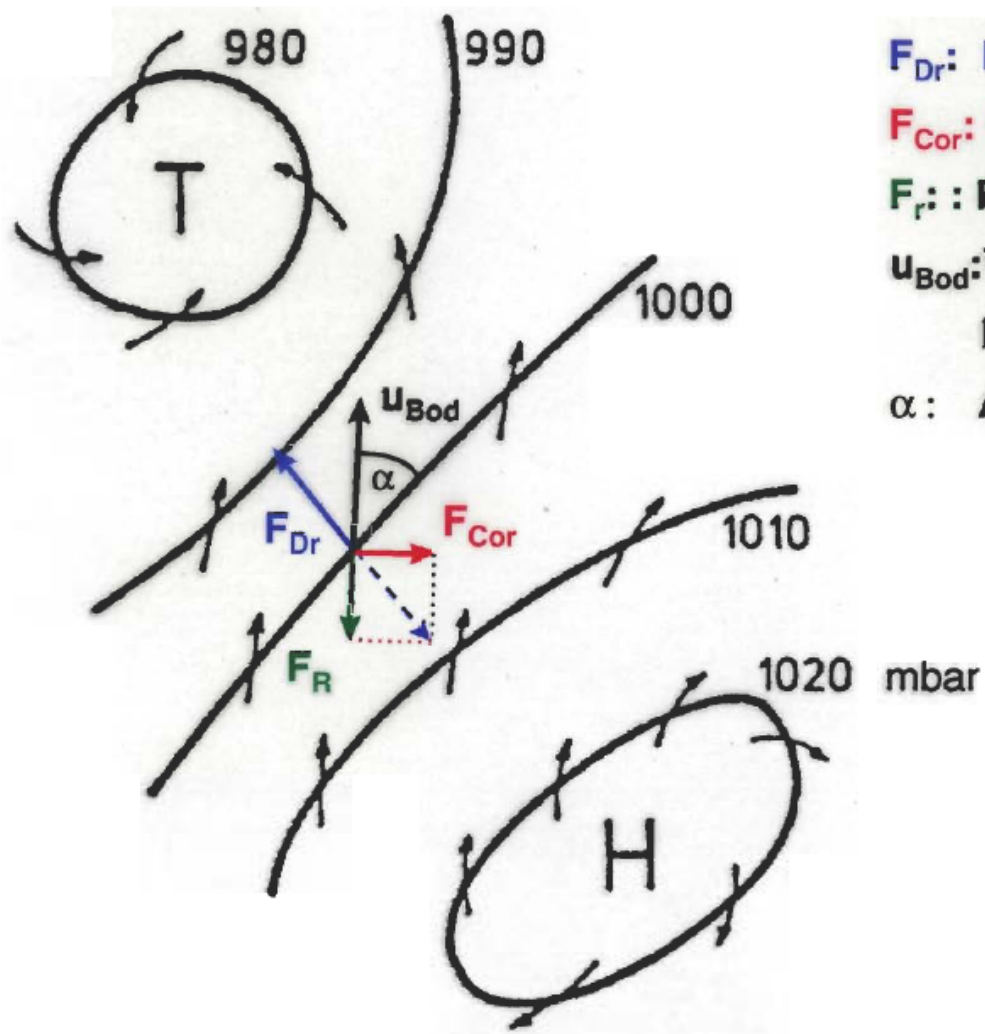
F_{Cor} : Corioliskraft

u_{Geo} : Vektor des
geostrophischen Windes



EIFER

Hoch-Tiefdruck bodennah



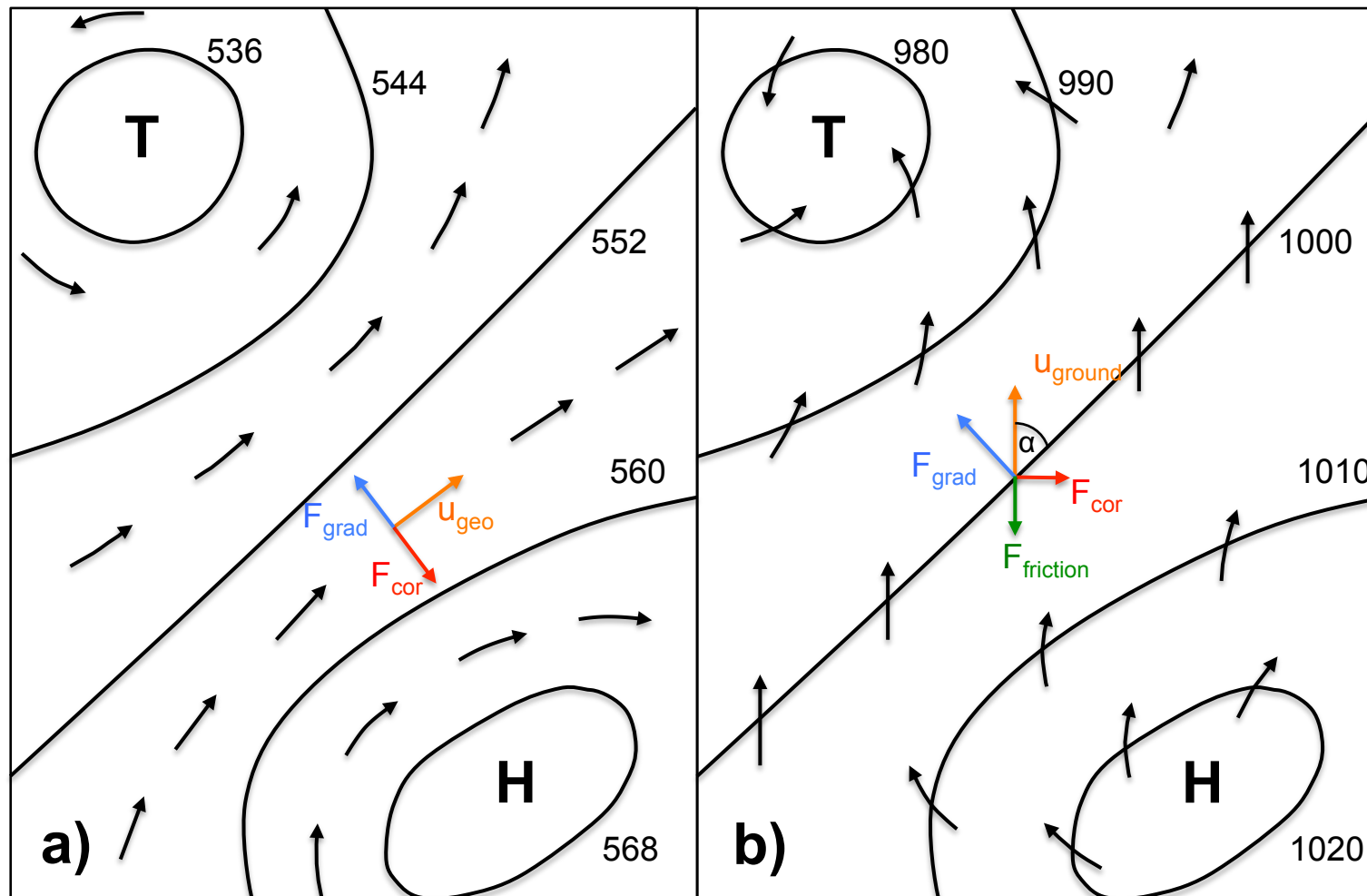
F_{Dr} : Druckgradientenkraft

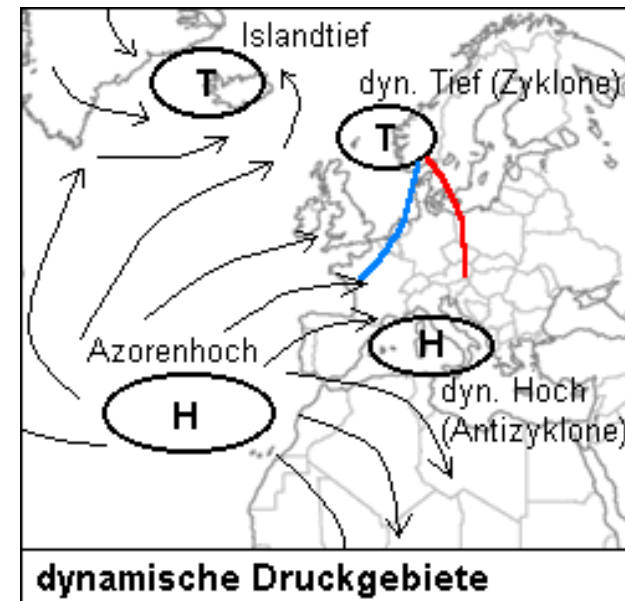
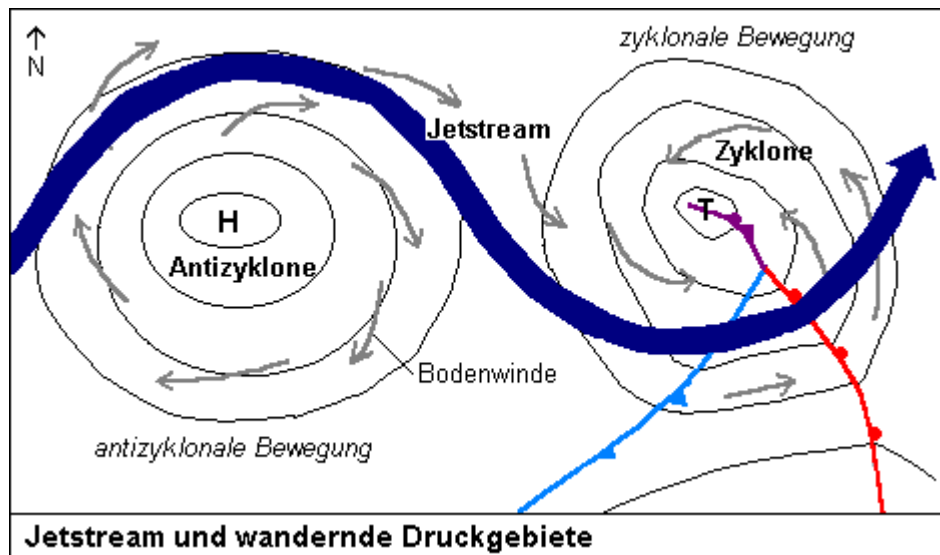
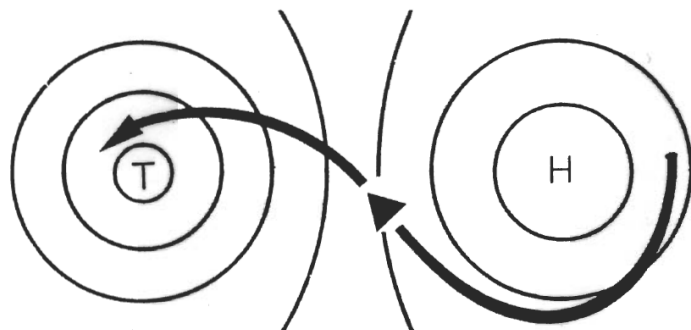
F_{Cor} : Corioliskraft

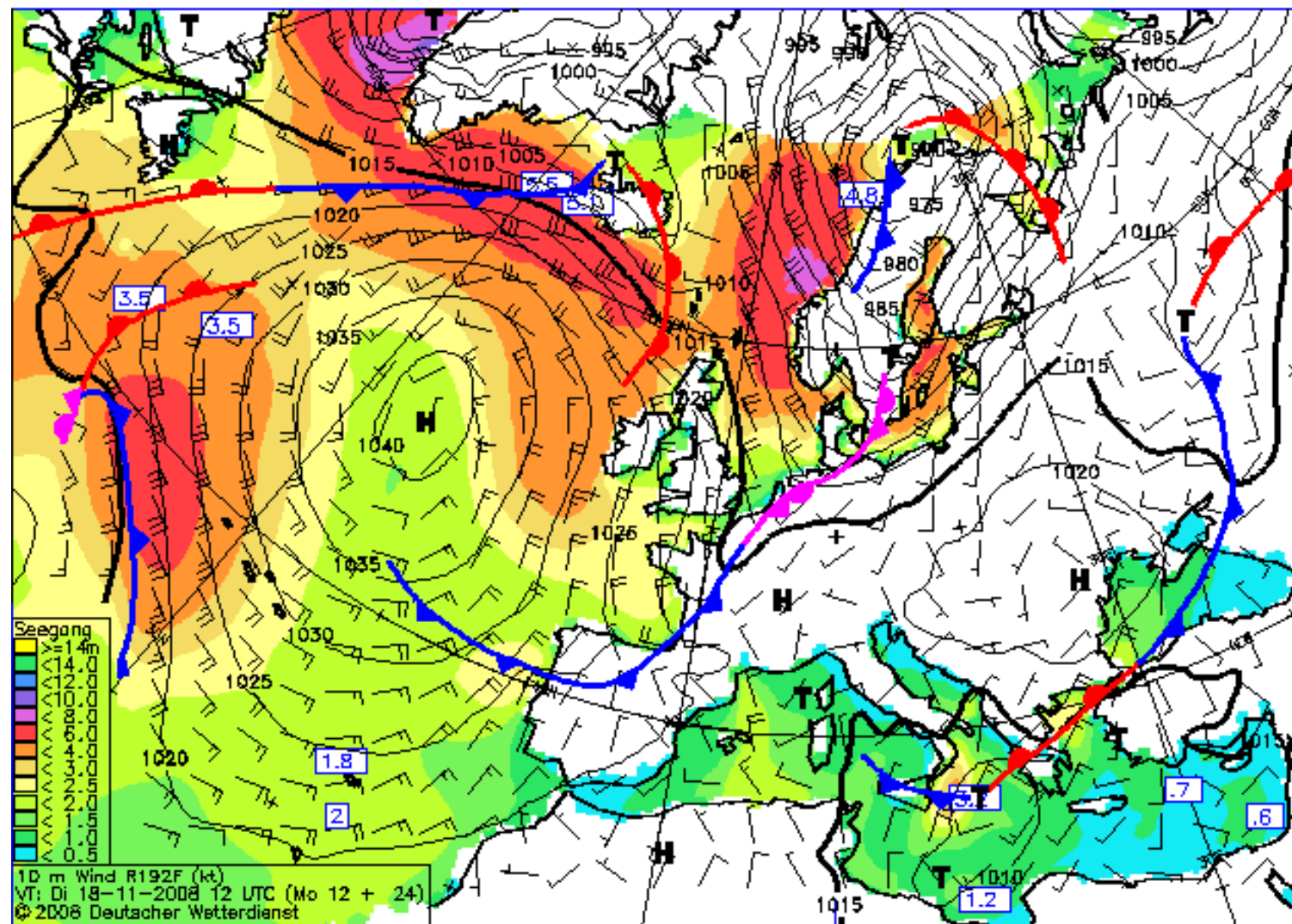
F_R : Reibungskraft

u_{Bod} : Vektor des
bodennahen Windes

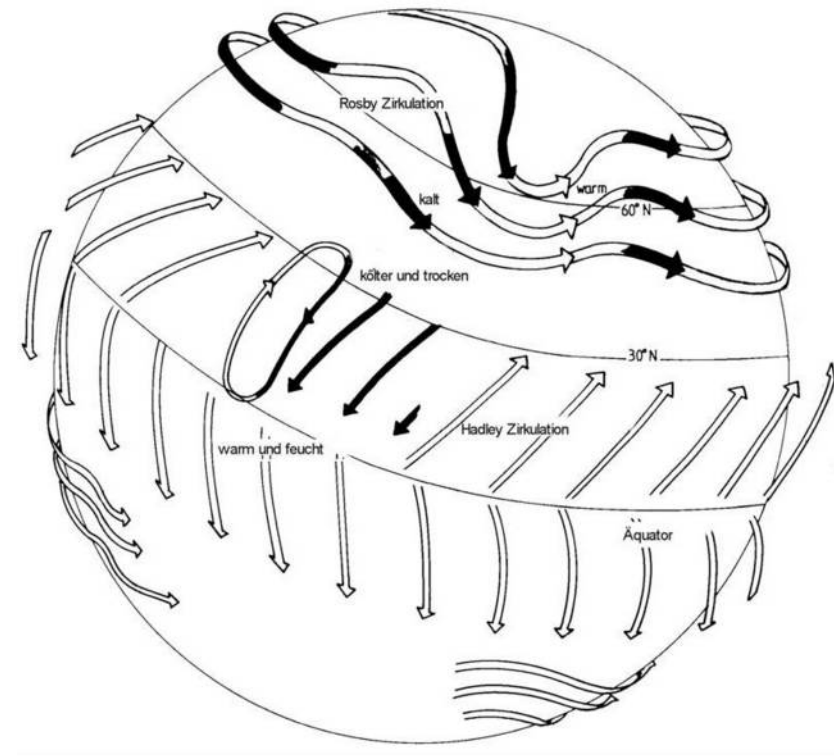
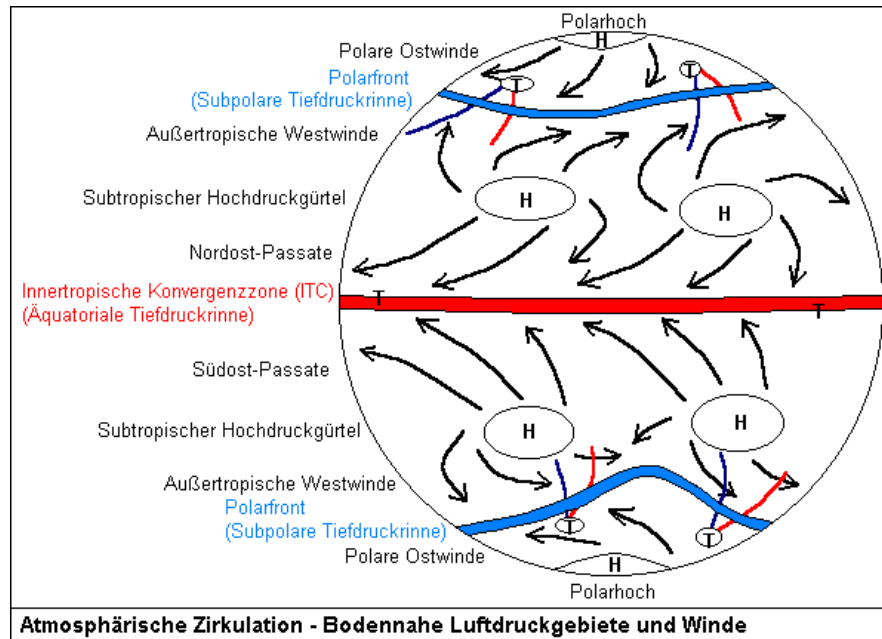
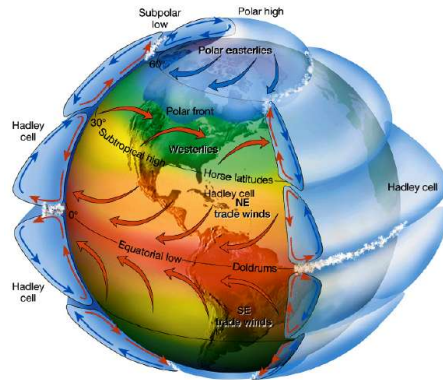
α : Ablenkungswinkel







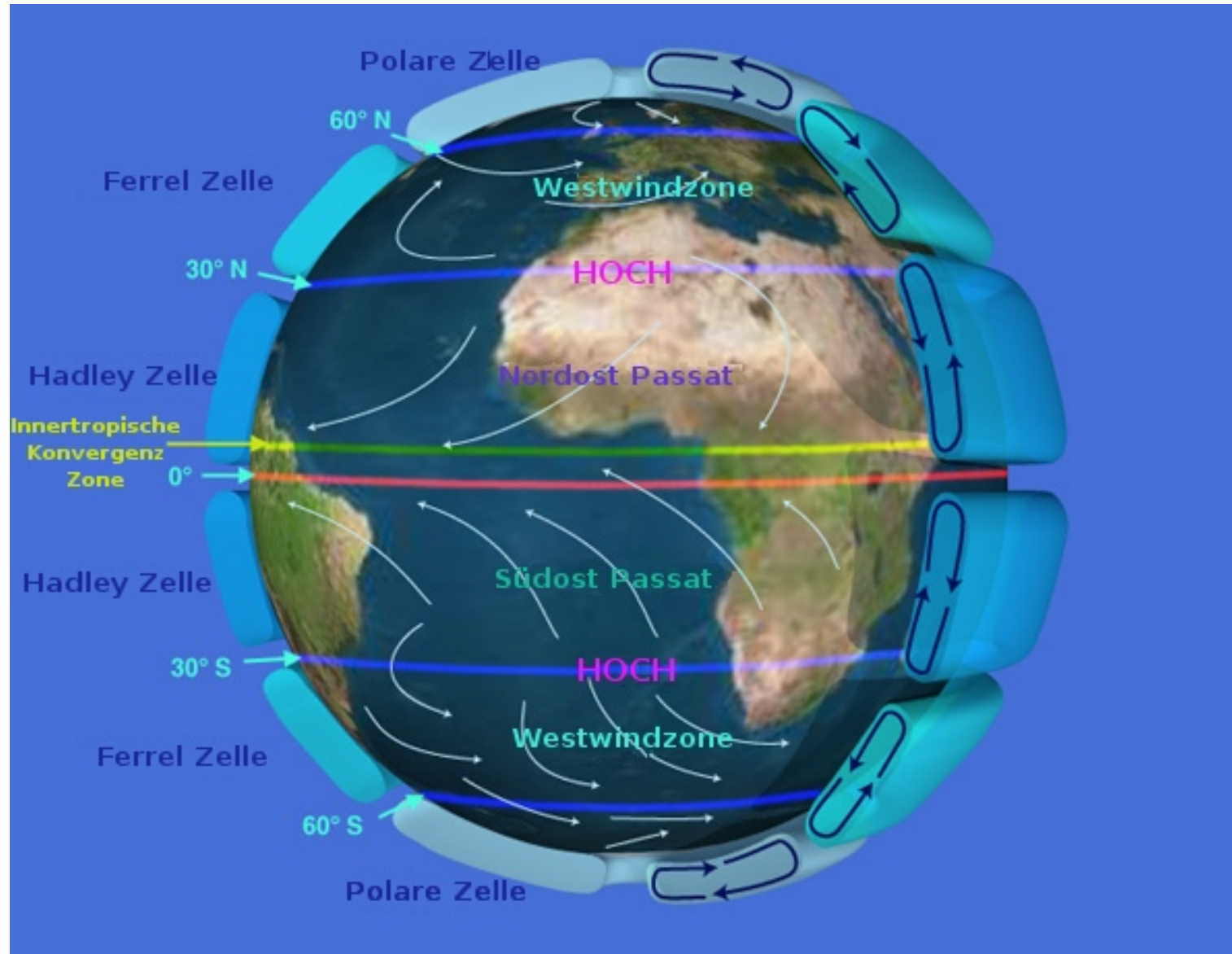
Globale Strömungen

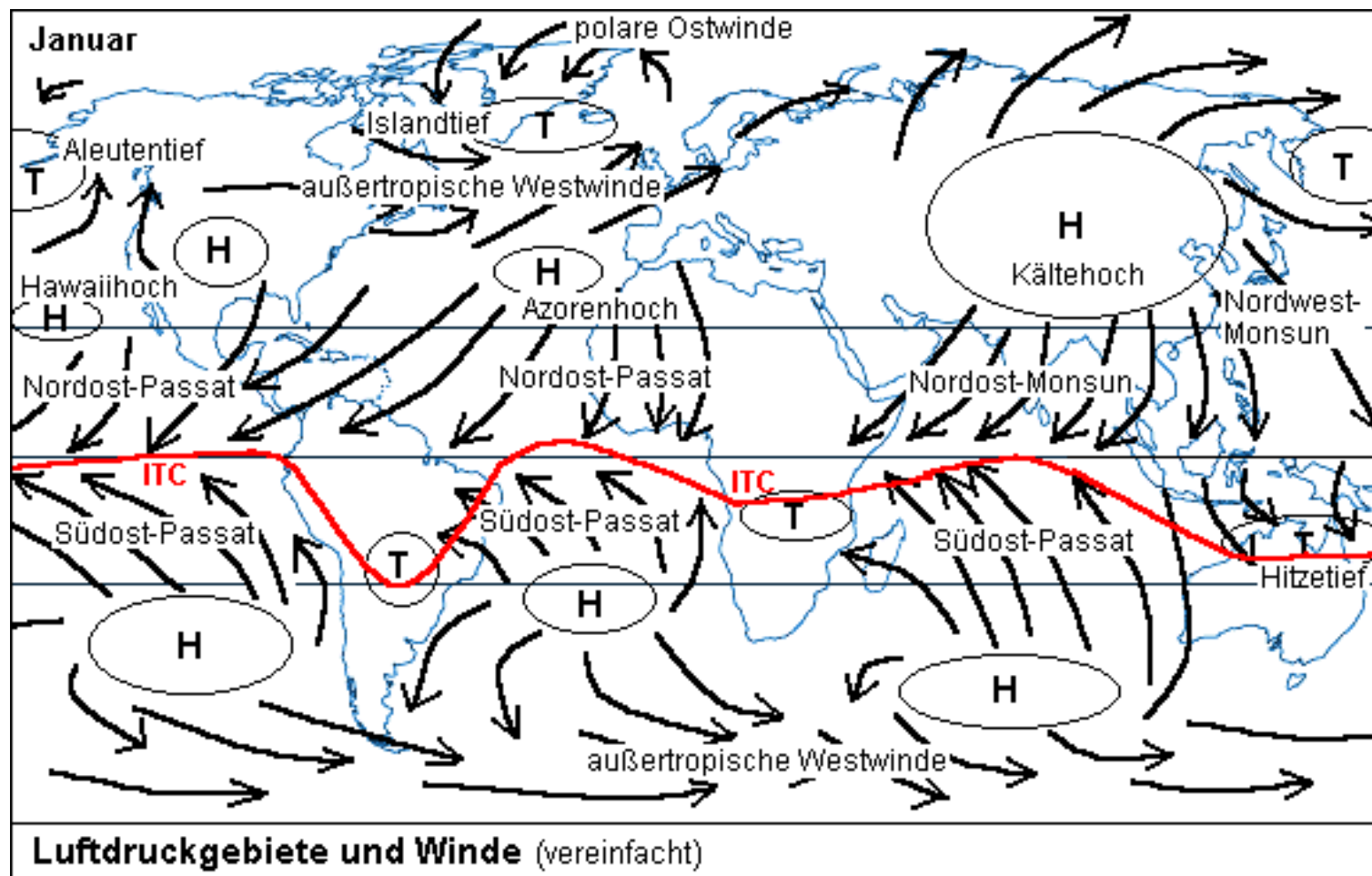




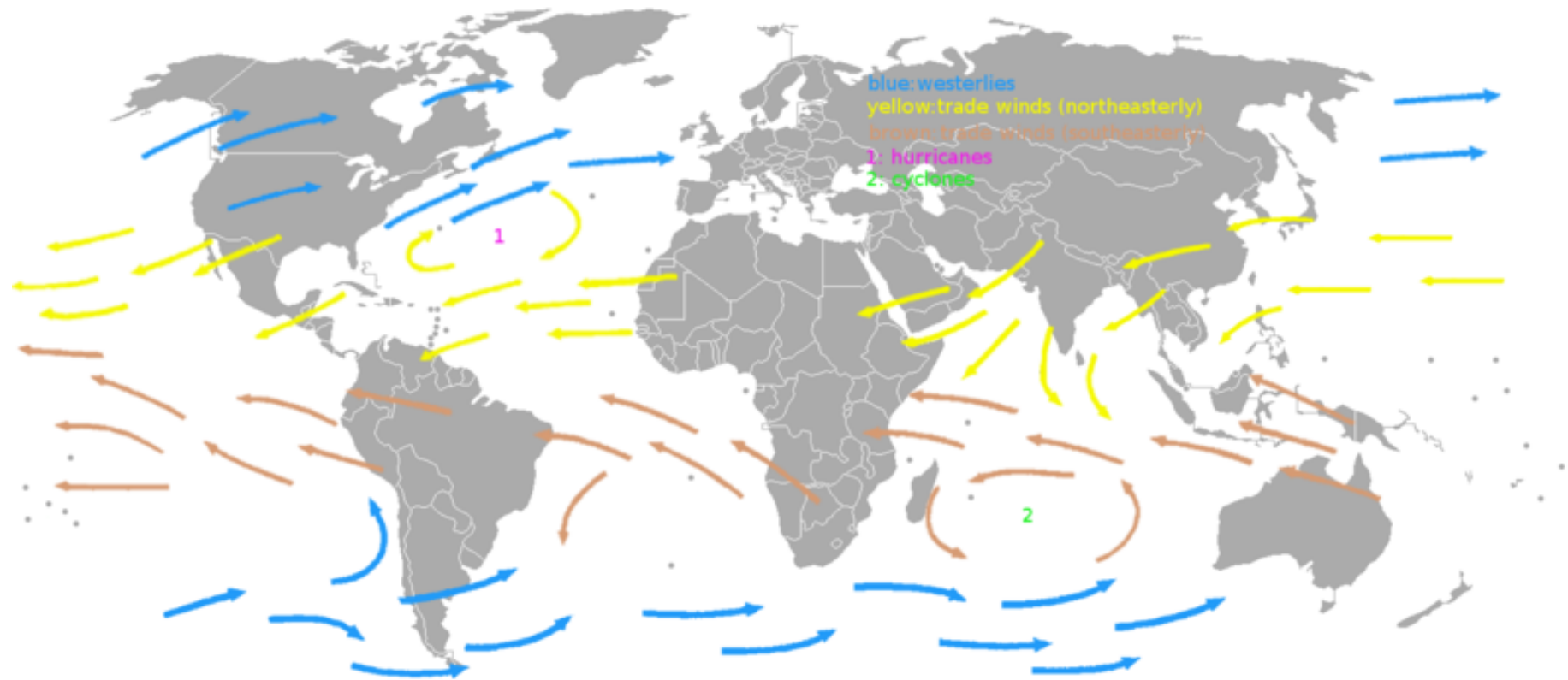
EIFER

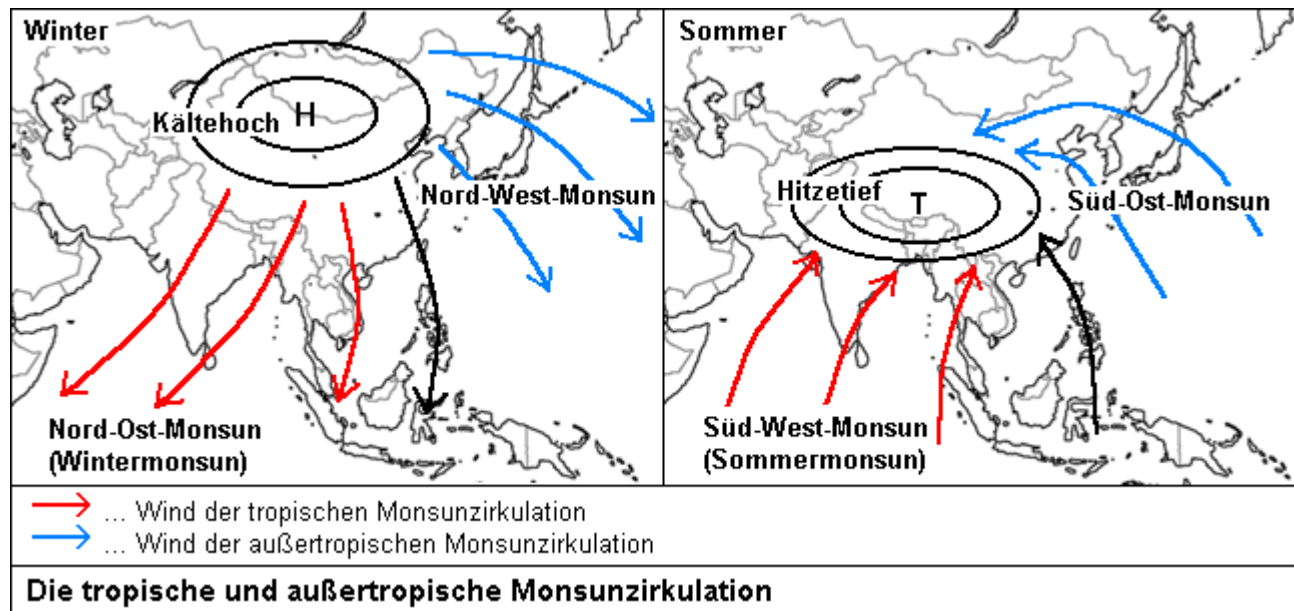
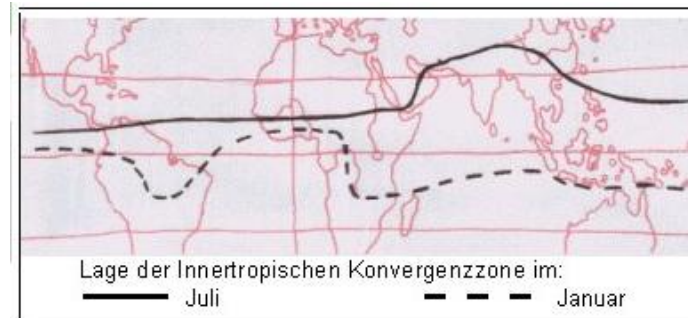
Globales Windsystem





„Globale“ Winde



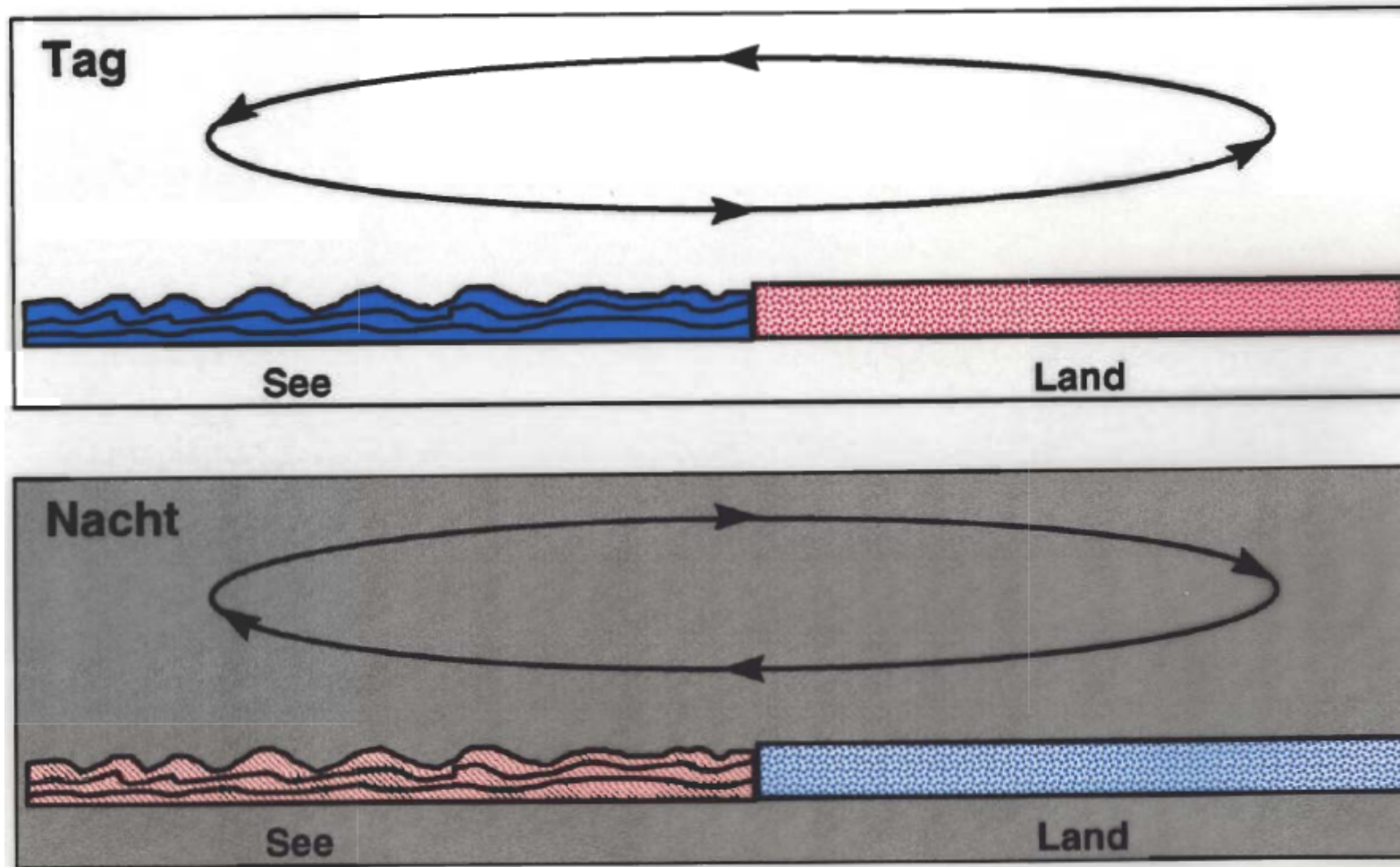




EIFER

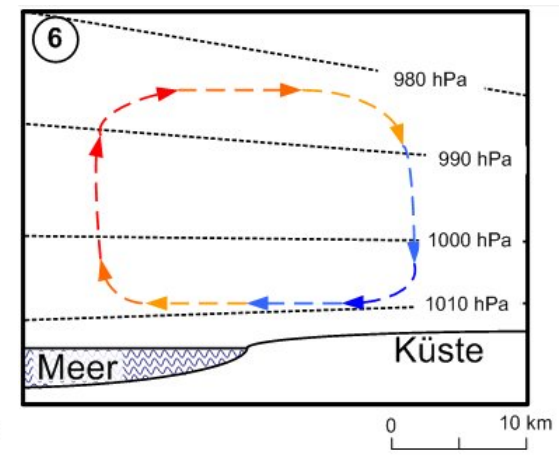
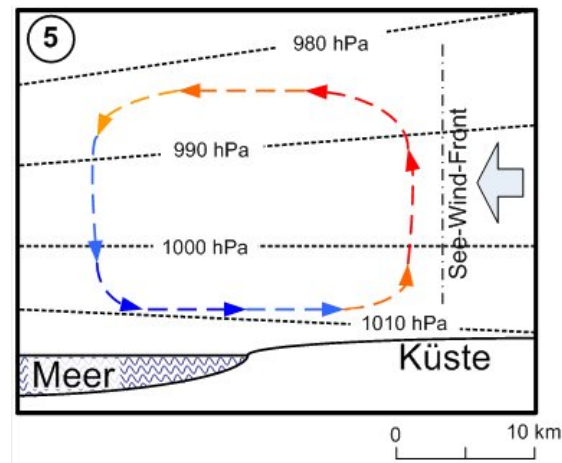
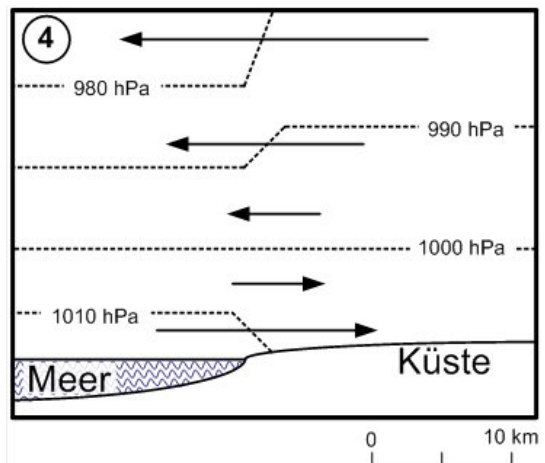
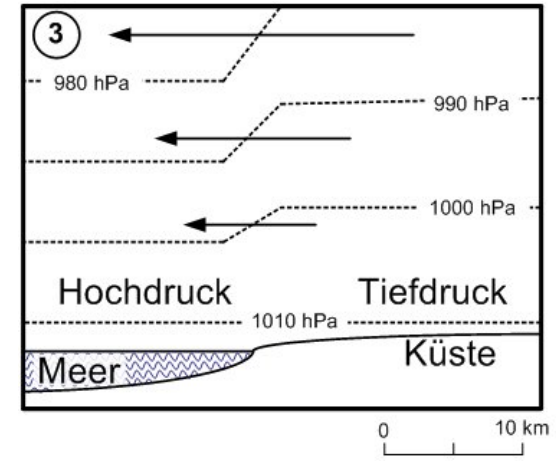
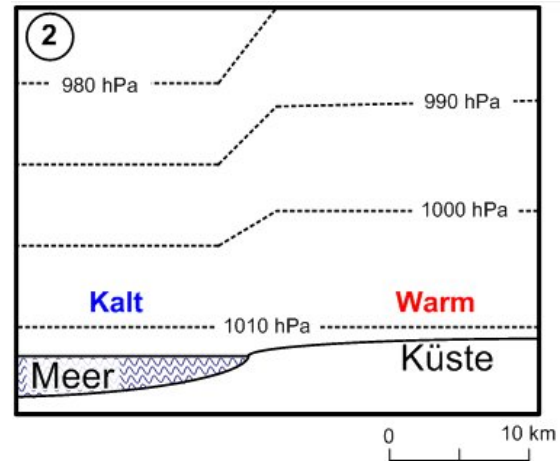
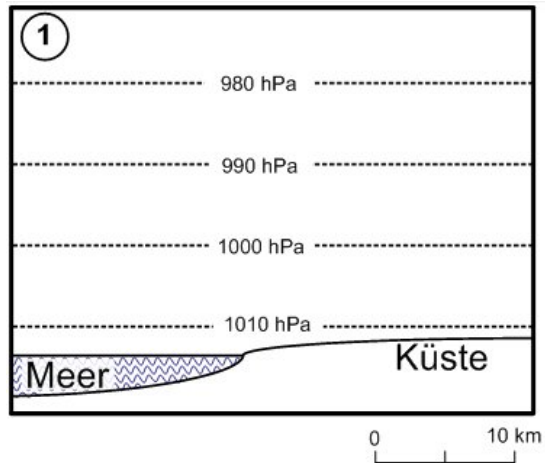
Lokale Windsysteme

Land- Seewind



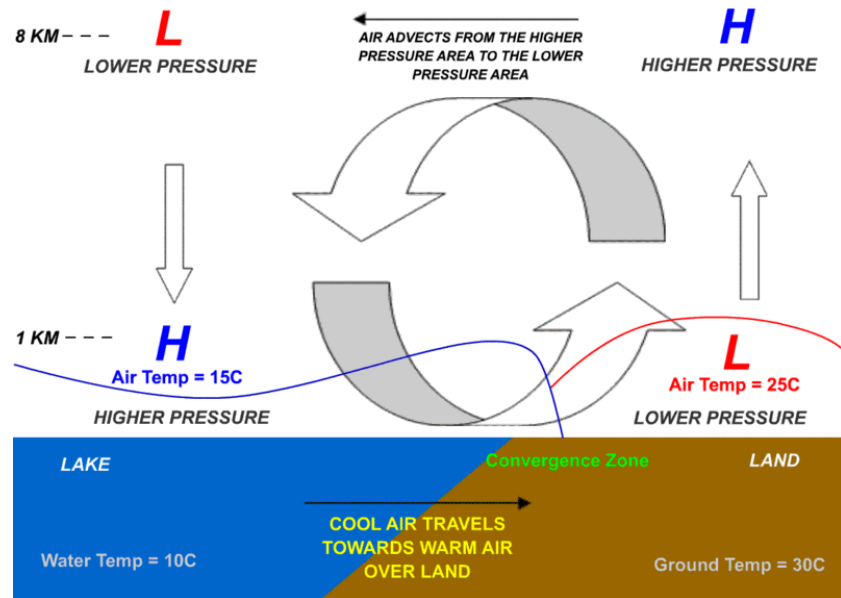
Lokale Windsysteme

Seewind Entwicklung (Landwind Nachts)

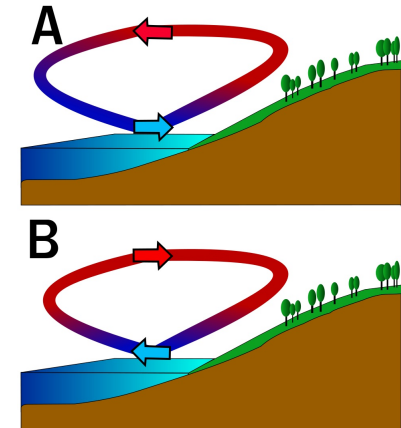


Lokale Windsysteme

Seewind



Lake Breeze



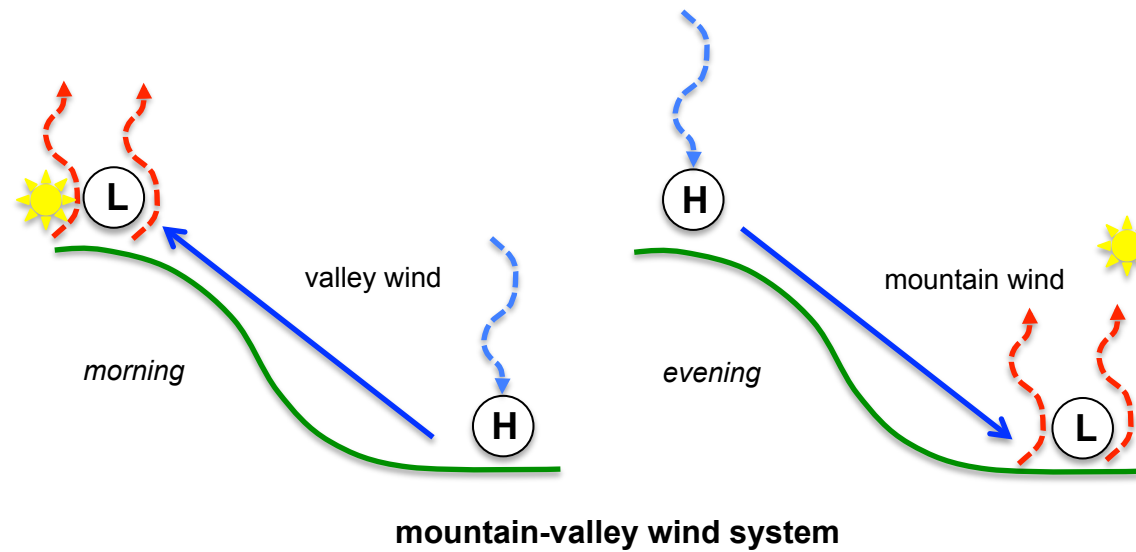
Daytime

Nighttime

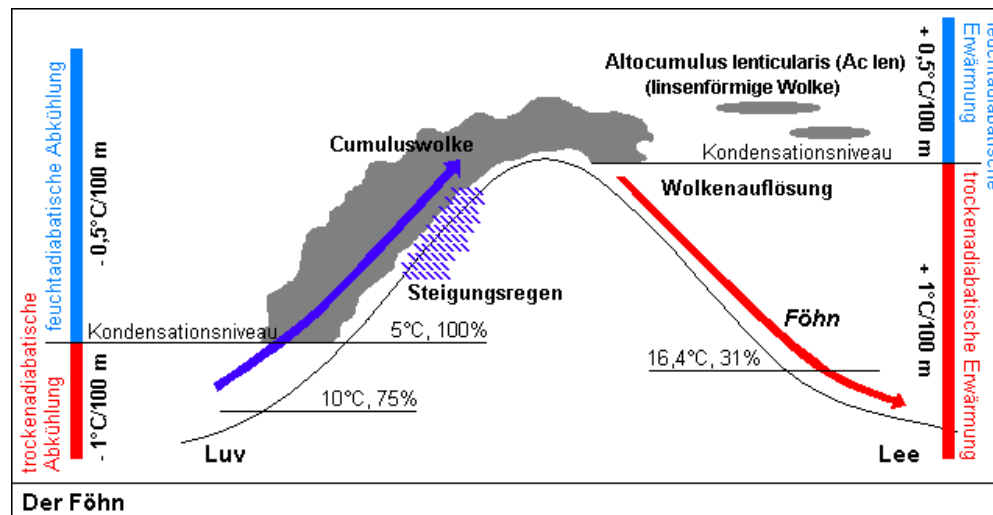
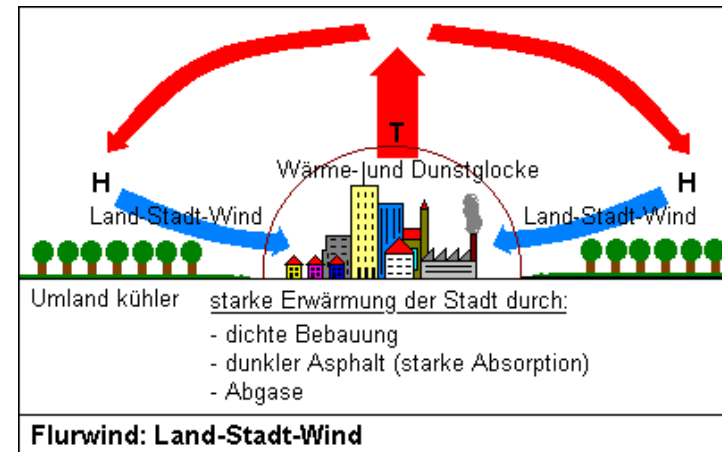
Lake Breeze
Sea Breeze / Land Breeze
Shore Side Wind
Onshore Wind
Diurnal Coastal Wind

Lokale Windsysteme

Seewind / Berg- Talwind



- *Land-See Wind*
- *Berg-Tal Wind*
- Flurwind Land-Stadt
- *Fallwinde*
- Föhn

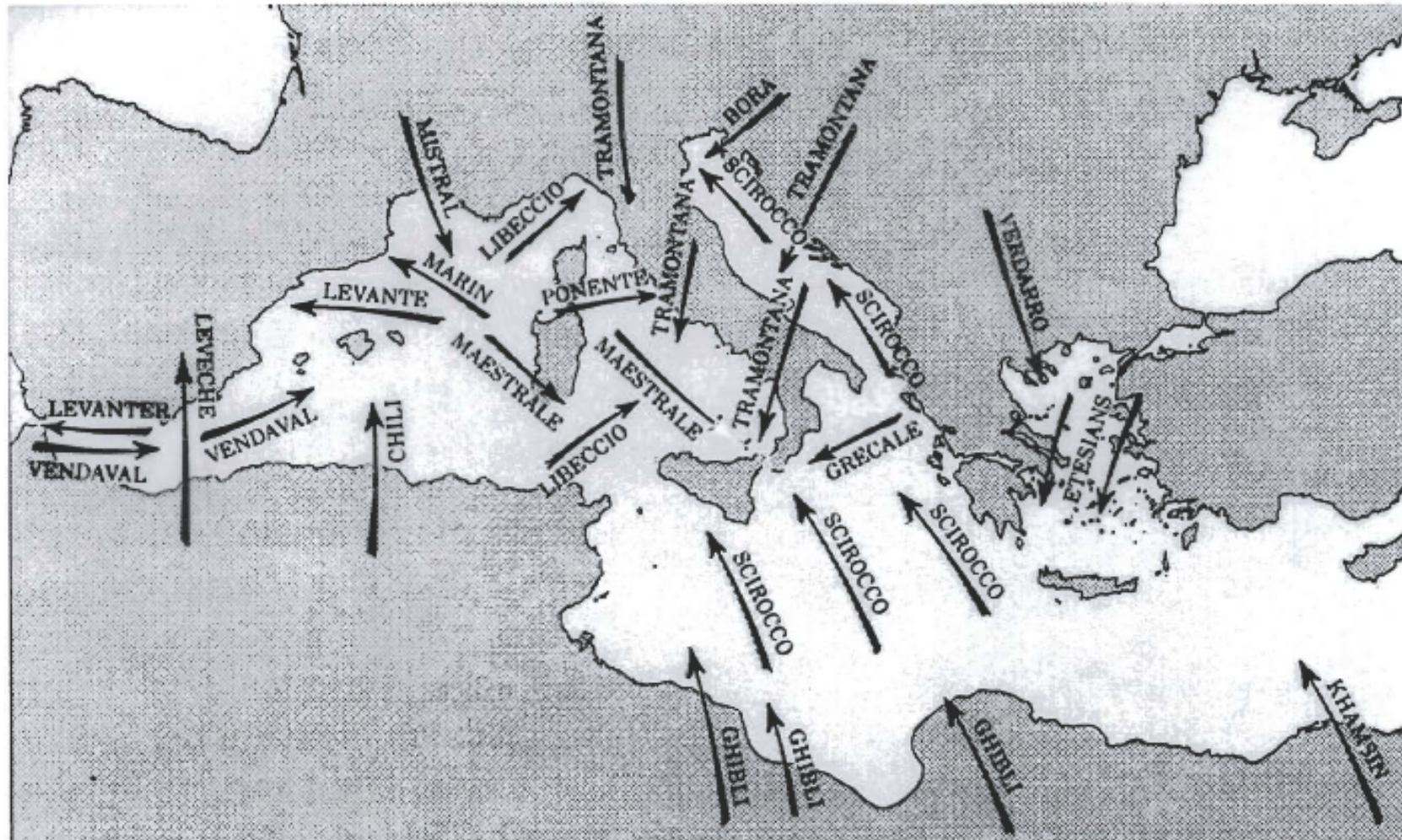




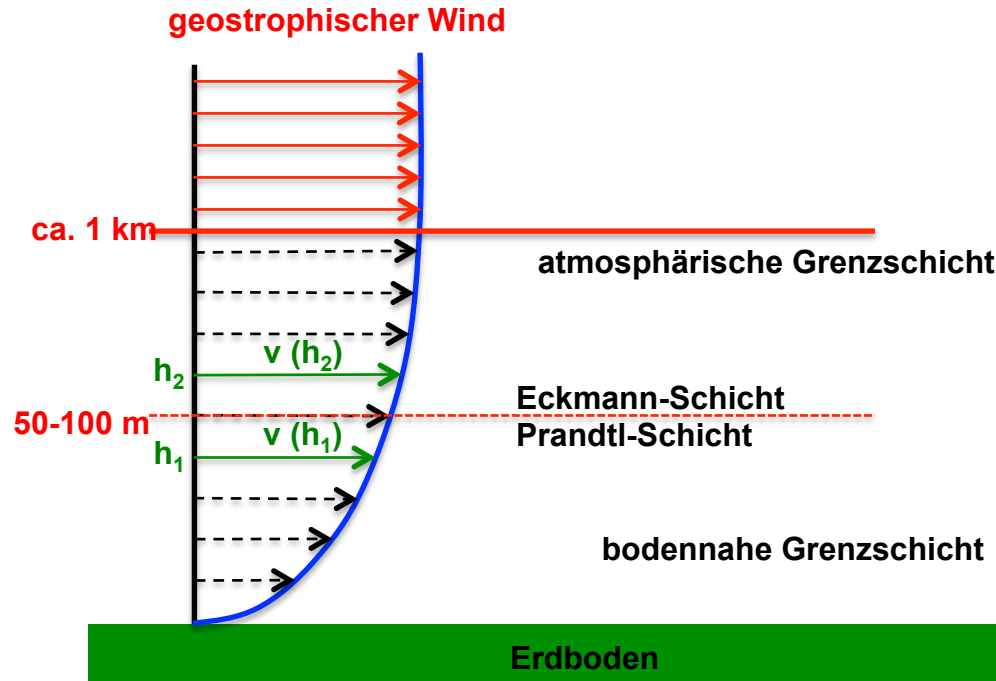


EIFER

Lokale Windsysteme Mittelmeer



Höhenprofil / Grenzschichtformel



$$v(h) = c \cdot \left[\ln \left(\frac{h}{z_0} \right) - \Psi \left(\frac{h}{L} \right) \right]$$

allgemeine Form
mit Störungsterm

$$v(h) = c \cdot \ln \left(\frac{h}{z_0} \right)$$

Vernachlässigung des
Störungsterms

$$\frac{v(h_2)}{v(h_1)} = \frac{\ln \left(\frac{h_2}{z_0} \right)}{\ln \left(\frac{h_1}{z_0} \right)}$$

Eliminierung der nur
empirisch zu bestimmenden
Konstanten c

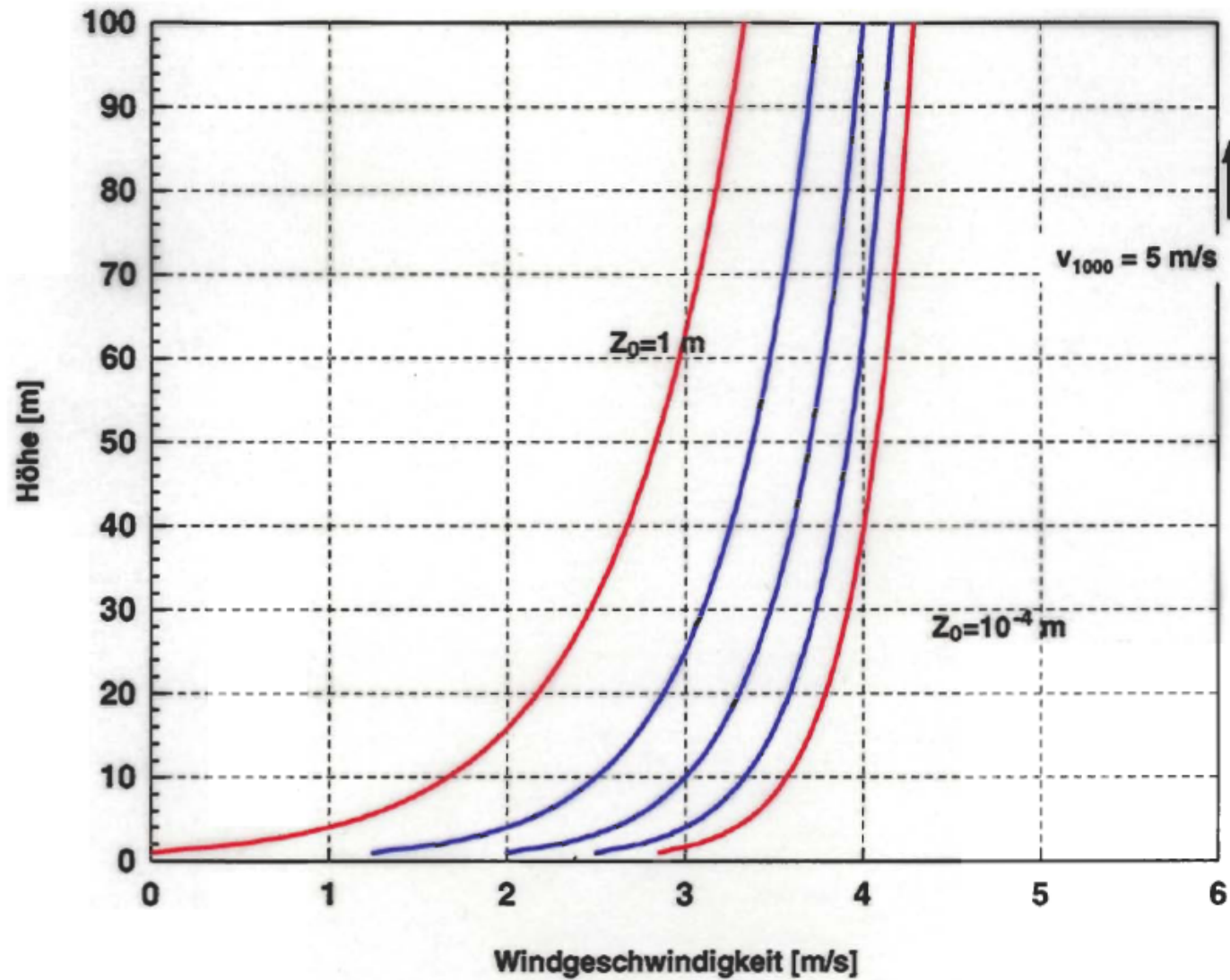
z_0 ist die Rauigkeitslänge
Ein Maß für die
Bodenbeschaffenheit



EIFER

Höhenprofil

Abhängigkeit von Rauigkeitslänge

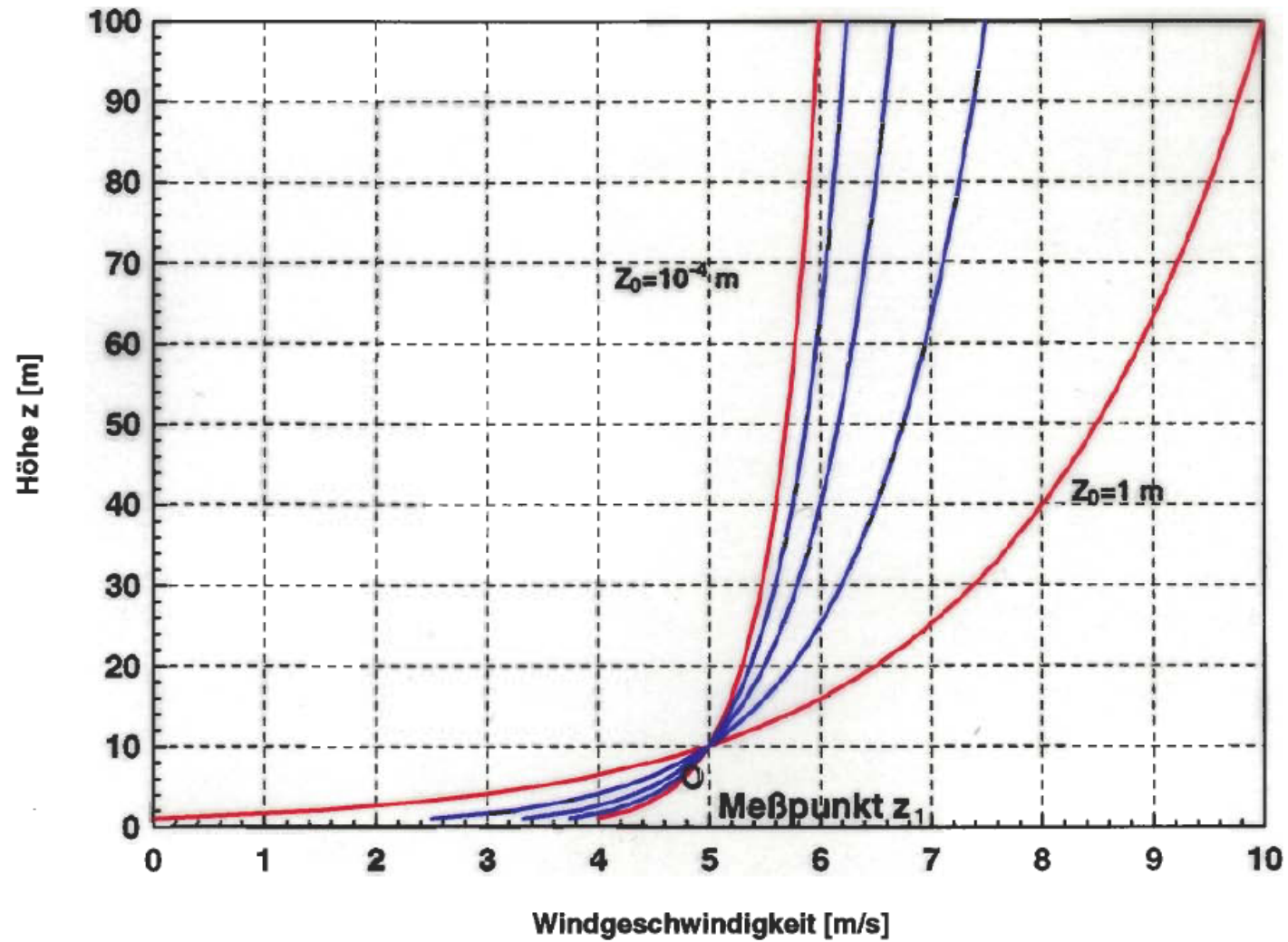




EIFER

Höhenprofil

Geschwindigkeitsprofile

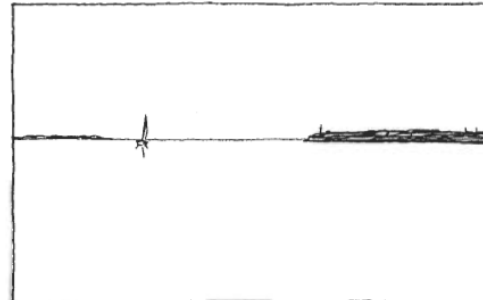




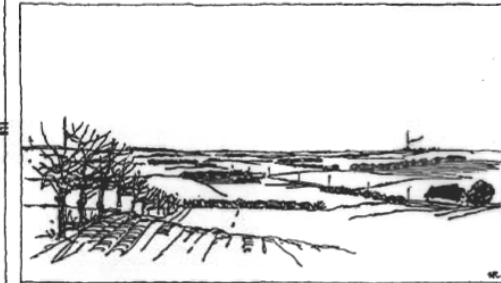
EIFER

Rauhigkeitslängen

z_0 [m]	Typen von Geländeoberflächen	Rauhigkeits-Klasse
1.00	Stadt	3
	Wald	
0.50	Vorstädte	
0.30	Bebautes Gelände	
0.20	Viele Bäume und/oder Büsche	2
0.10	Landwirtschaftliches Gelände mit geschlossenem Erscheinungsbild	
0.05	Landwirtschaftliches Gelände mit offenem Erscheinungsbild	
0.03	Landwirtschaftliches Gelände mit sehr wenigen Gebäuden, Bäumen usw.	1
	Flughäfen mit Gebäuden und Bäumen	
0.01	Flughäfen, Start- u. Landebahn	0
	Weidegras	
$5 \cdot 10^{-3}$	Blanke Erde (glatt)	
10^{-3}	Schneeoberflächen (glatt)	0
$3 \cdot 10^{-4}$	Sandoberflächen (glatt)	
10^{-4}	Wasserflächen (Seen, Fjorde und das Meer)	



Rauhigkeitsklasse 0 ($z_0=0,00(2)$ m)



Rauhigkeitsklasse 2 ($z_0=0,10$ m)



Rauhigkeitsklasse 1 ($z_0=0,03$ m)



Rauhigkeitsklasse 3 ($z_0=0,40$ m)



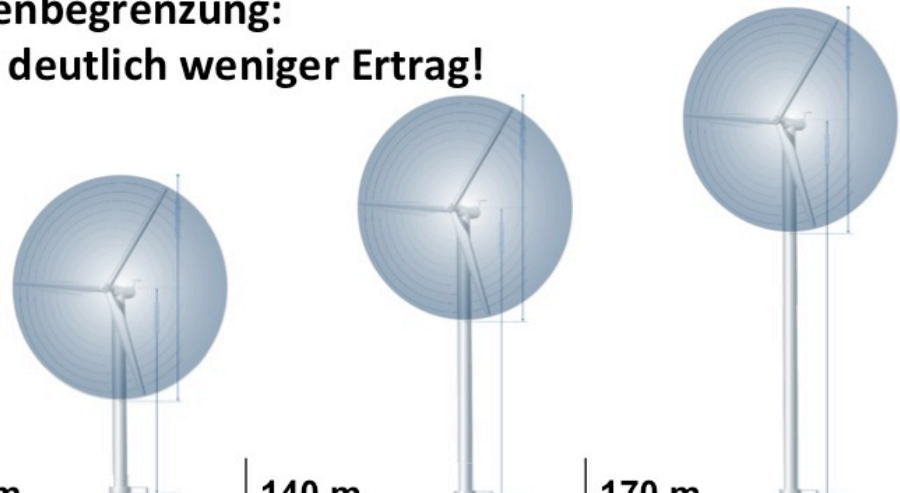
Höhenprofil Höhengradient



Höhenabhängigkeit der Ertrags



**Auswirkung einer Höhenbegrenzung:
Gleiche Nennleistung - deutlich weniger Ertrag!**



	100 m	140 m	170 m
Gesamthöhe	100 m	140 m	170 m
Nennleistung	2000 kW	2000 kW	2000 kW
Rotordurchmesser	80 m	80 m	90 m
Nabenhöhe	60 m	100 m	125 m
Ertrag	4,4 Mio. kWh/a	5,2 Mio. kWh/a	6,5 Mio. kWh/a
Volllaststunden	2.200 h/a	2.600 h/a	3.250 h/a



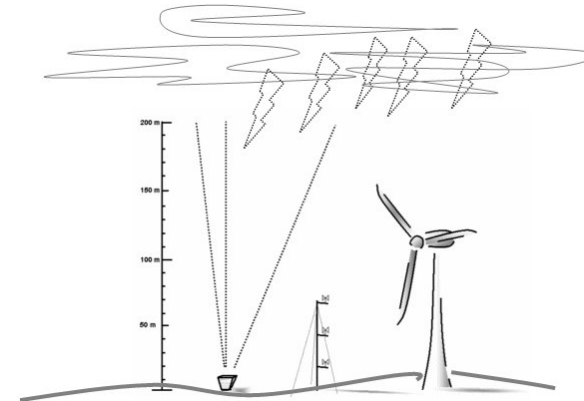
Windmessung Anemometer & SODAR



Schalenkreuz-
Anemometer



Ultraschall-
Anemometer



SODAR
Sonic Detecting
And Ranging
40 – 600 m
20 m Schichtung

LiDAR
Light Detection
And Ranging

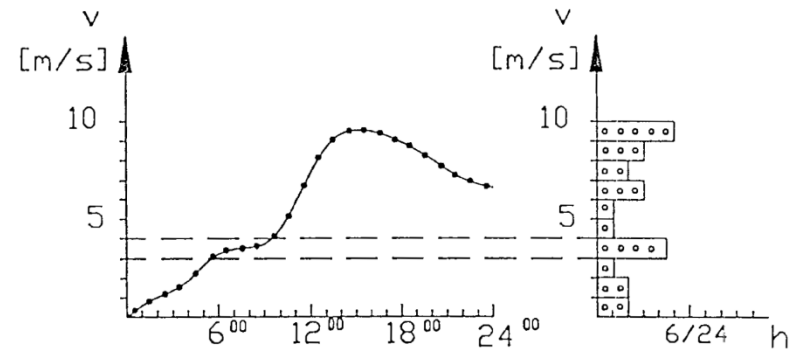
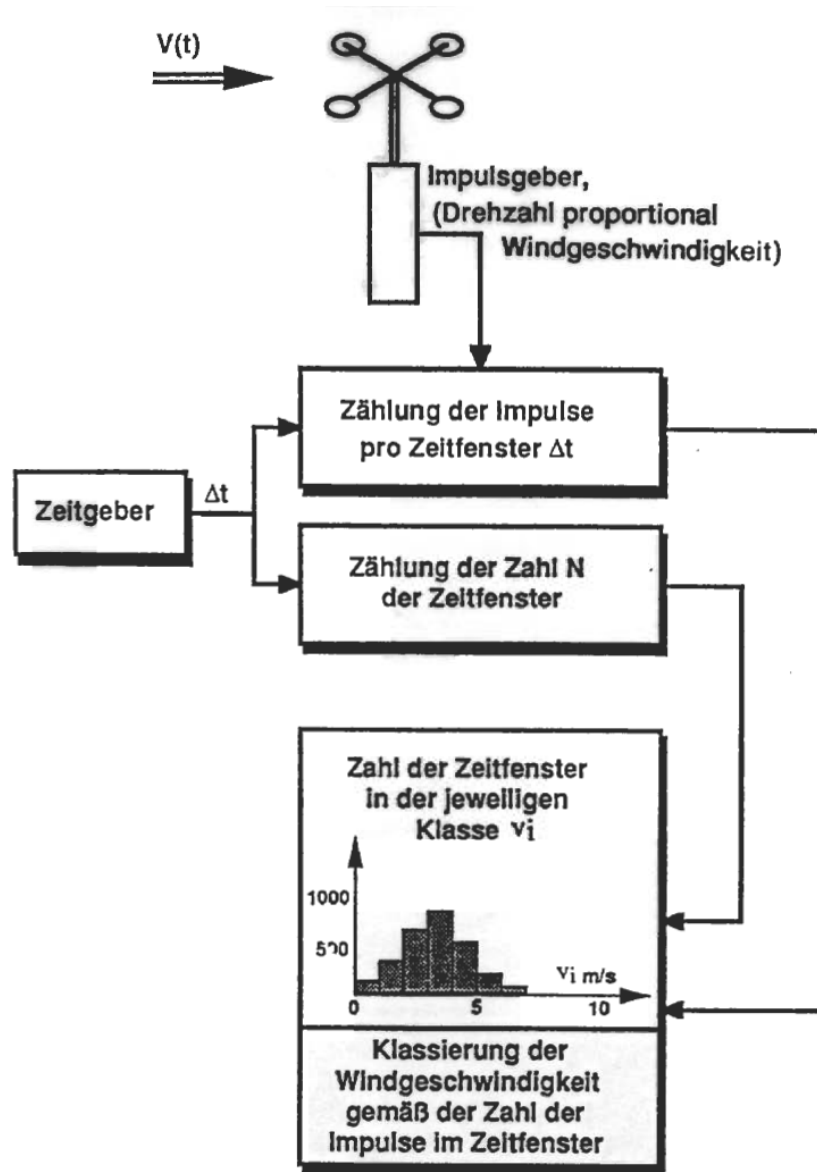
LaDAR
Laser Detection
And Ranging

40 - 200m
 v 0 – 70 m/s
 Δv 0,1 m/s



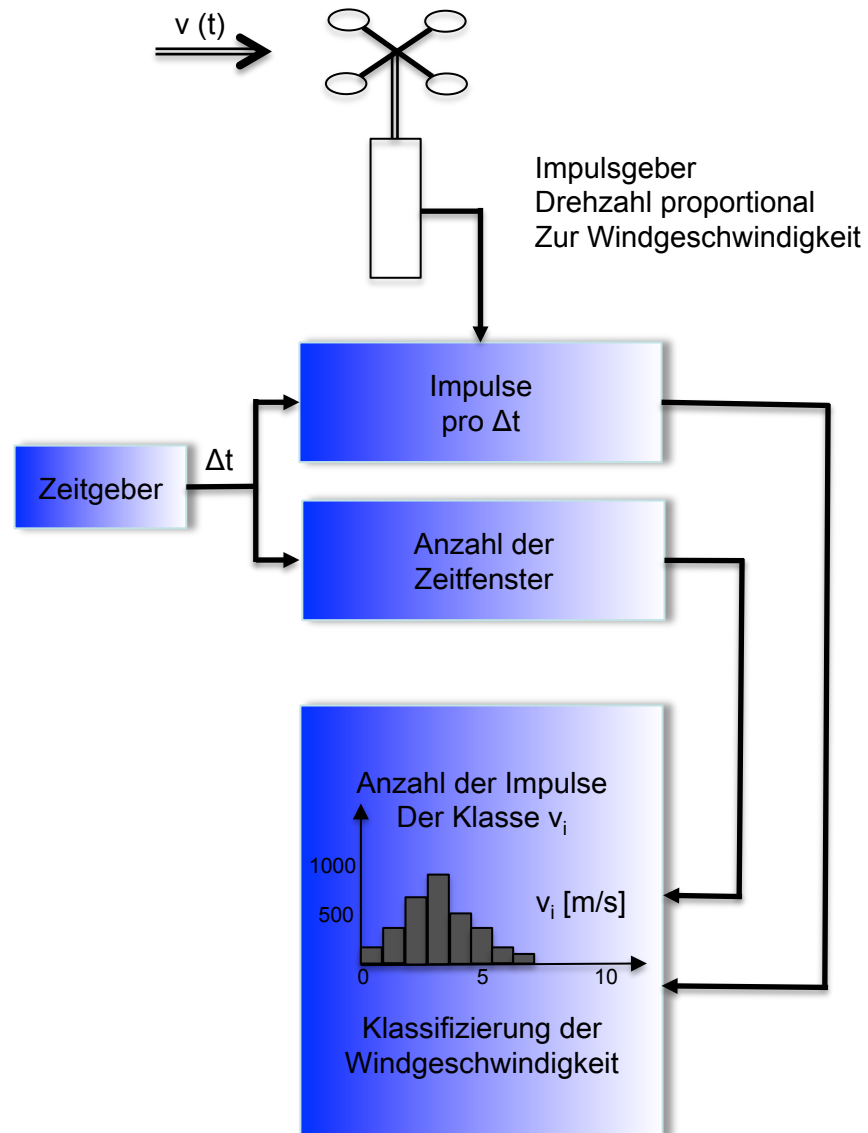
Häufigkeitsverteilung

Grundprinzip / Histogramm

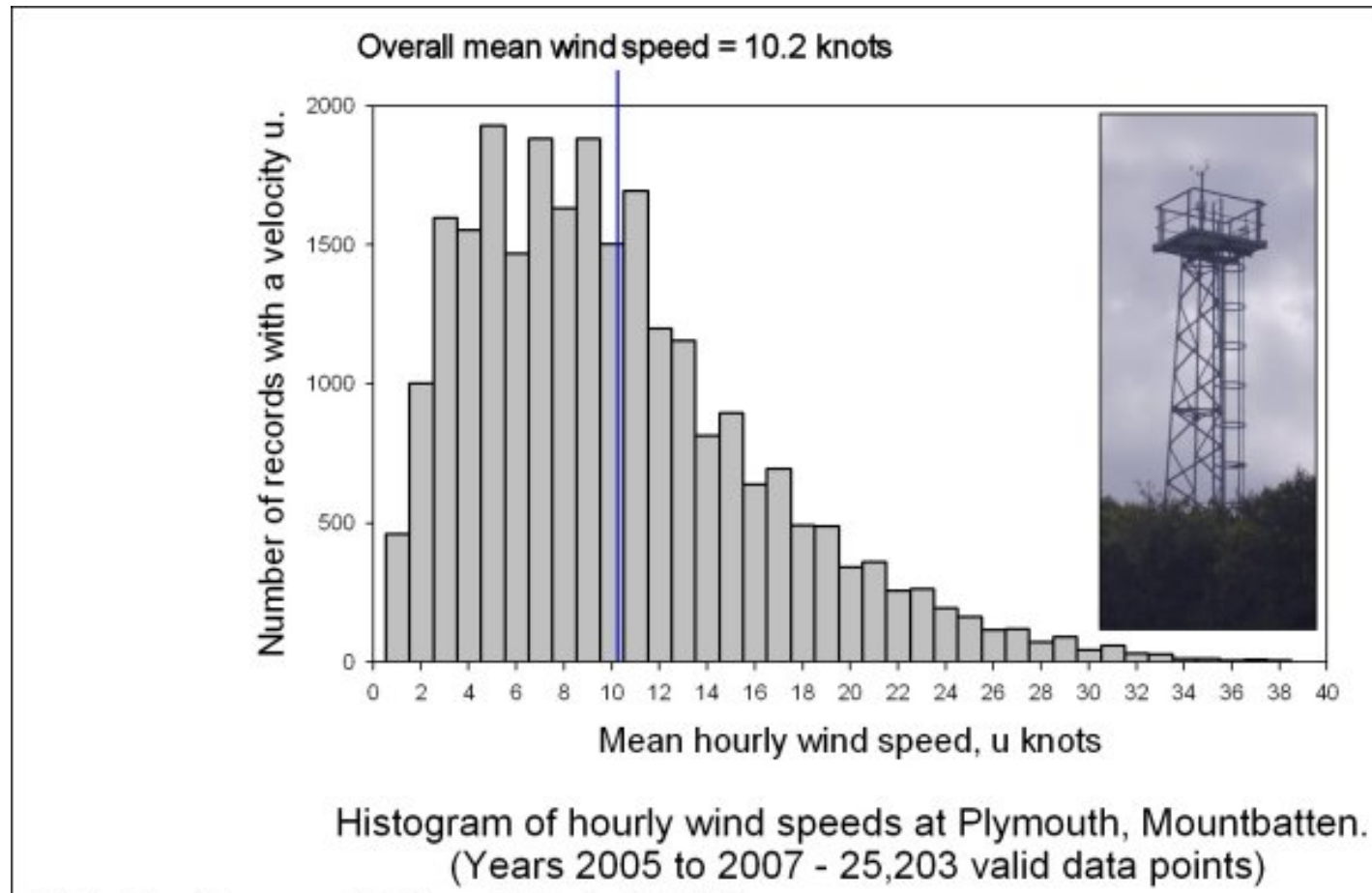


Häufigkeitsverteilung

Grundprinzip / Histogramm



Windhistogramm



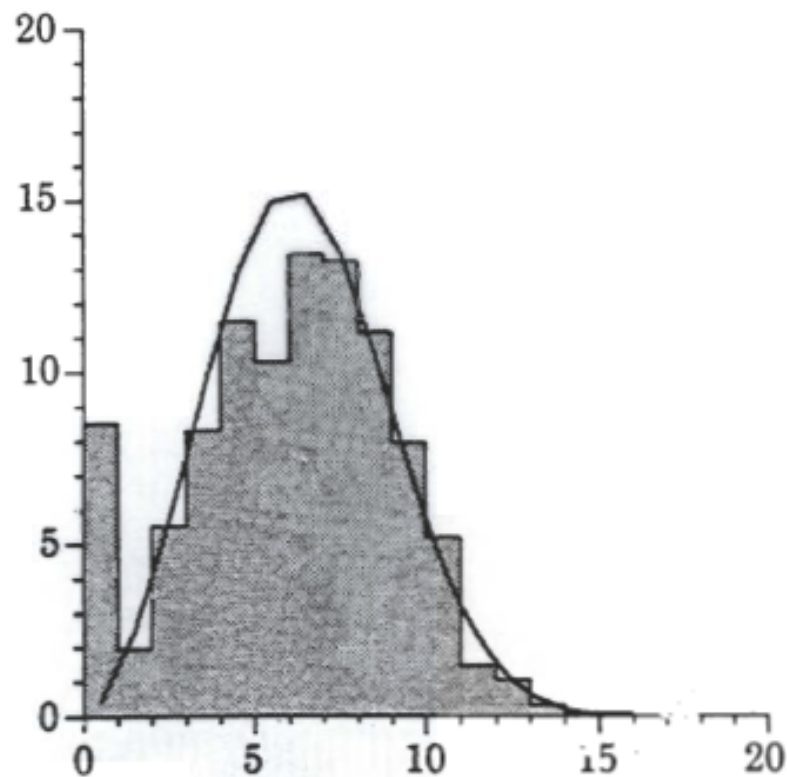


EIFER

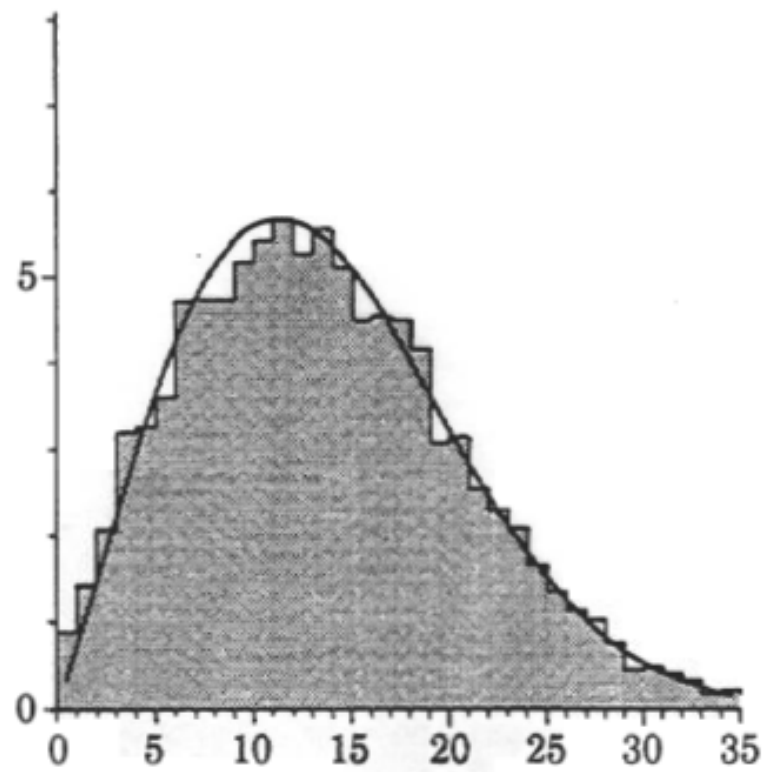
Häufigkeitsverteilung

Beispiele I

Fuerteventura, Kanarische Inseln, Spanien
 $A = 7.2 \text{ m s}^{-1}$, $k = 2.78$



Snaefell, Großbritannien
 $A = 15.4 \text{ m s}^{-1}$, $k = 2.08$



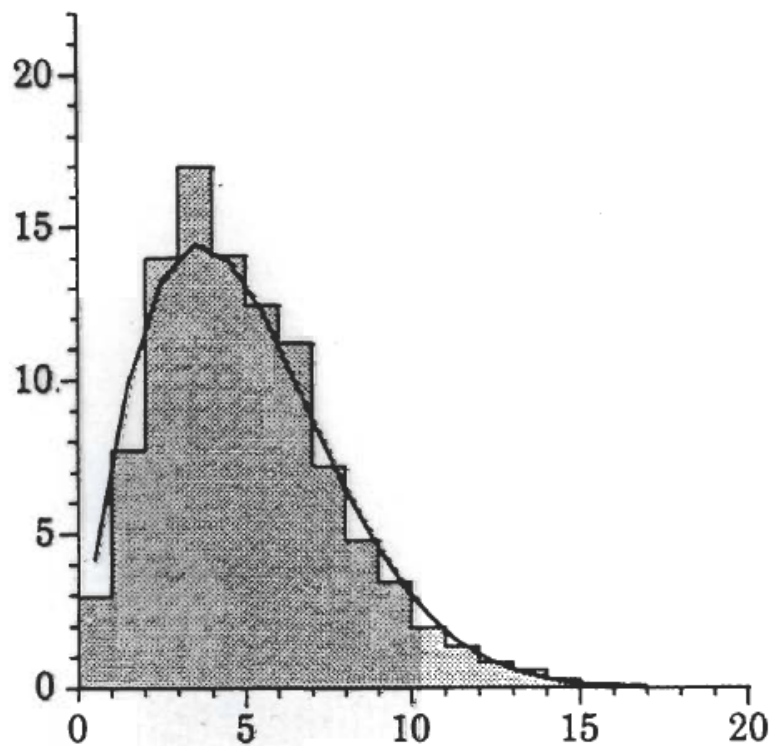


EIFER

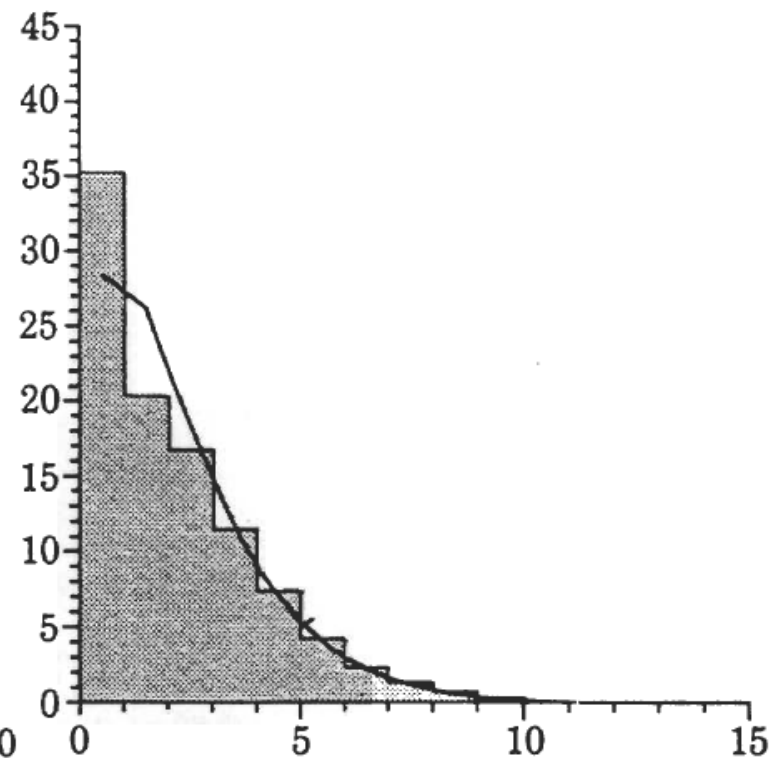
Häufigkeitsverteilung

Beispiele II

Schiphol, Niederlande
 $A = 5.6 \text{ m s}^{-1}$, $k = 1.83$



Mont de Marsan, Frankreich
 $A = 2.4 \text{ m s}^{-1}$, $k = 1.24$





Weibullverteilung

$$f(v) = \frac{K}{A} \cdot \left(\frac{v}{A} \right)^{K-1} \cdot e^{-\left(\frac{v}{A} \right)^K} \left[\frac{\text{Prozent}}{m / s} \right]$$

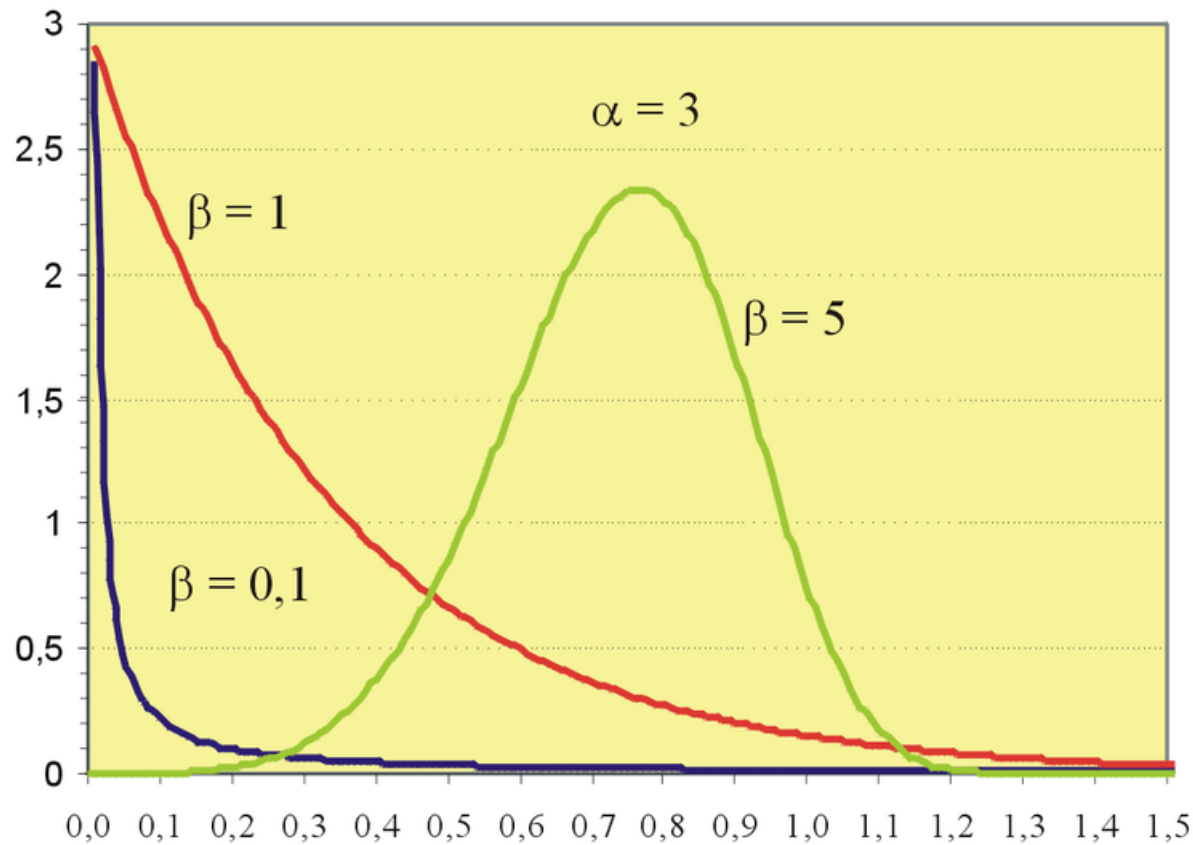
- $F(v)$ Auftrittswahrscheinlichkeit der Windgeschwindigkeit je Windgeschwindigkeitsintervall
- v Geschwindigkeit im betrachteten Intervall
- A Skalierungsfaktor (scale parameter)
- K Formparameter (shape parameter)
- A & K z.B. „Europäischer Windatlas“



Rayleigh-Verteilung

$$f(v) = \frac{\pi}{2} \cdot \left(\frac{v}{v_m^2} \right) \cdot e^{-\left(\frac{\pi}{4} \right) \cdot \left(\frac{v}{v_m} \right)^2} \left[\frac{\text{Prozent}}{m / s} \right]$$

- v_m mittlere Windgeschwindigkeit
- v Geschwindigkeit im betrachteten Intervall
- A entsprechend mittleren Verteilungen
- K Formparameter $K=2$



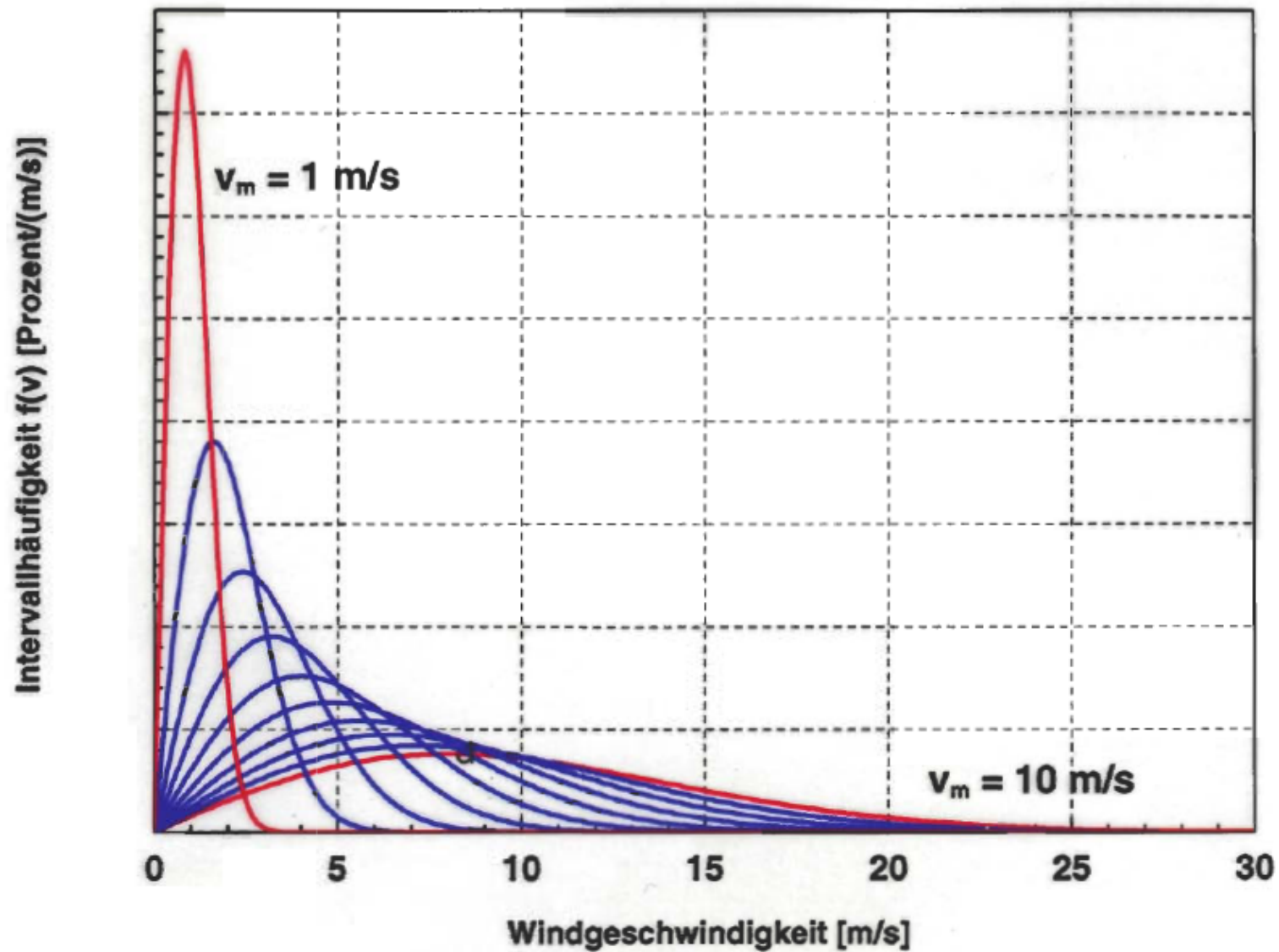
$$f(x) = \alpha \beta x^{\beta-1} e^{-\alpha x^{\beta}}$$

$$\text{Wei}\left(\frac{1}{2\sigma^2}, 2\right) = \text{Rayleigh}(\sigma^2)$$

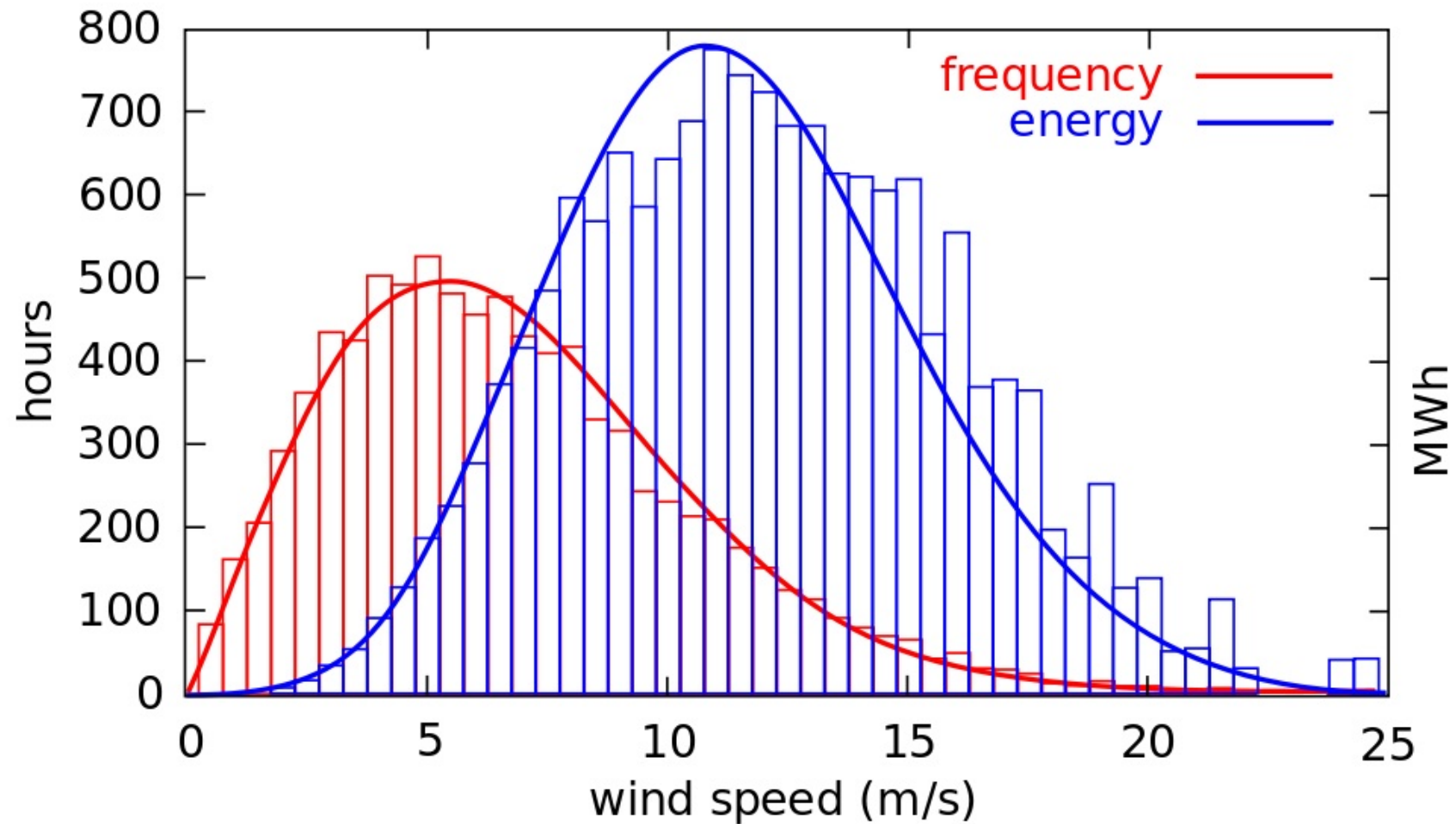


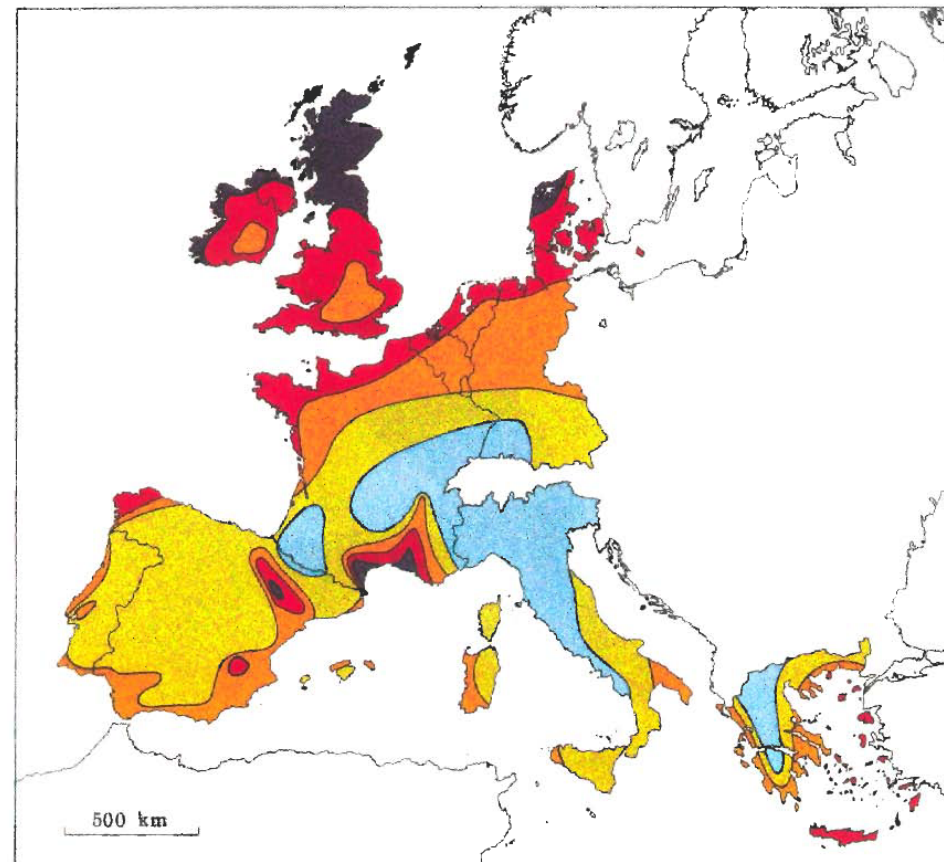
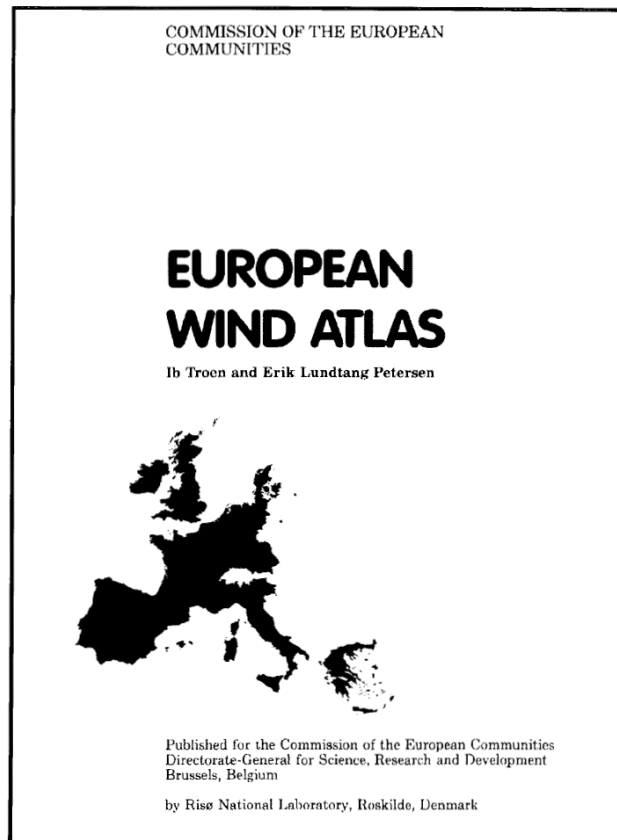
EIFER

Rayleigh-Verteilung



Geschwindigkeits- und Energieverteilung

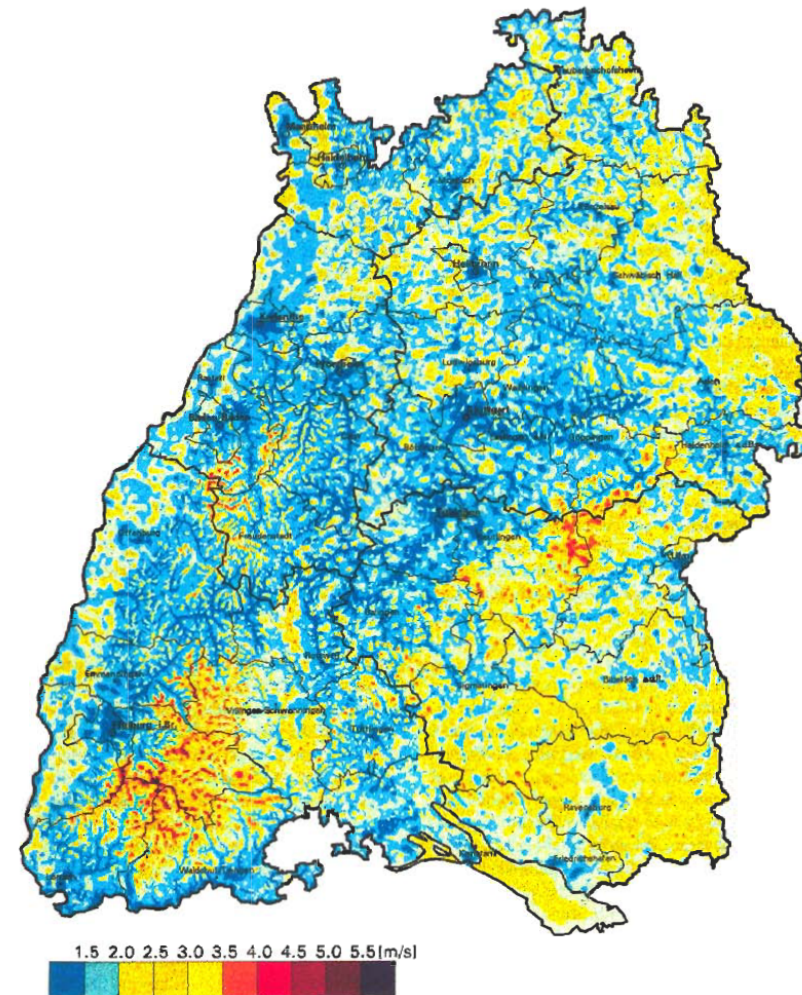
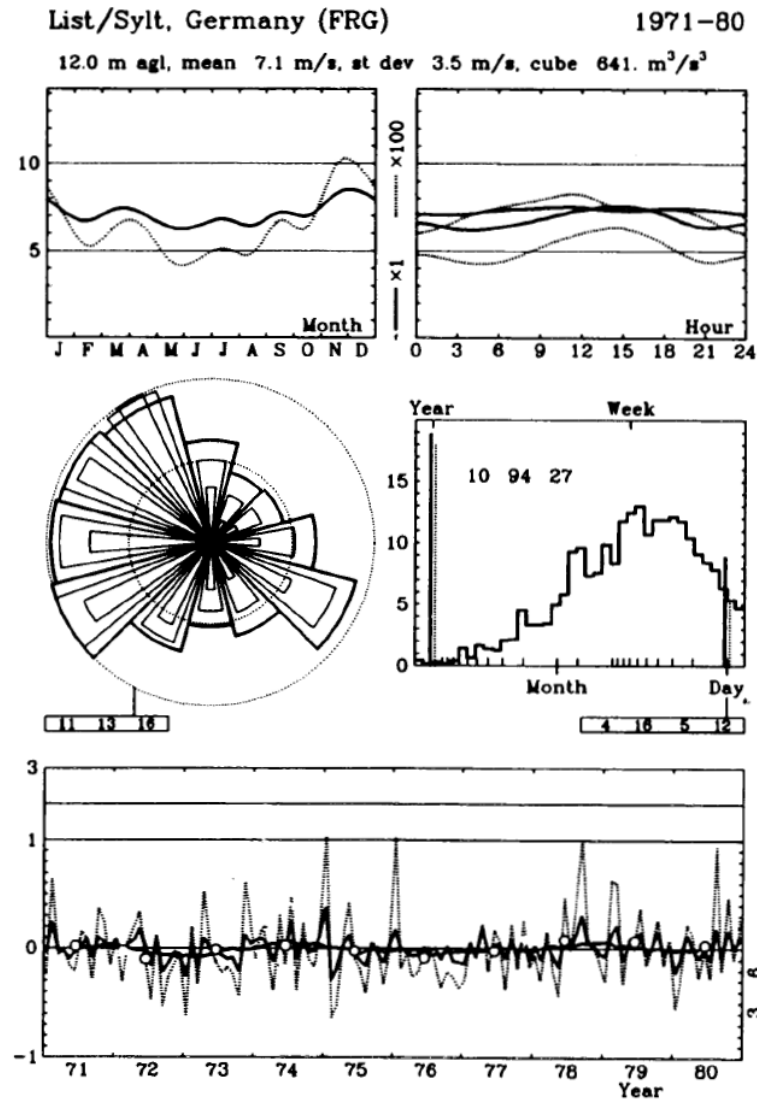




Wind resources ¹ at 50 metres above ground level for five different topographic conditions									
	Sheltered terrain ²		Open plain ³		At a sea coast ⁴		Open sea ⁵		Hills and ridges ⁶
	m s ⁻¹	Wm ⁻²	m s ⁻¹	Wm ⁻²	m s ⁻¹	Wm ⁻²	m s ⁻¹	Wm ⁻²	m s ⁻¹ Wm ⁻²
	> 6.0	> 250	> 7.5	> 500	> 8.5	> 700	> 9.0	> 800	> 11.5 > 1800
	5.0-6.0	150-250	6.5-7.5	300-500	7.0-8.5	400-700	8.0-9.0	600-800	10.0-11.5 1200-1800
	4.5-5.0	100-150	5.5-6.5	200-300	6.0-7.0	250-400	7.0-8.0	400-600	8.5-10.0 700-1200
	3.5-4.5	50-100	4.5-5.5	100-200	5.0-6.0	150-250	5.5-7.0	200-400	7.0-8.5 400-700
	< 3.5	< 50	< 4.5	< 100	< 5.0	< 150	< 5.5	< 200	< 7.0 < 400

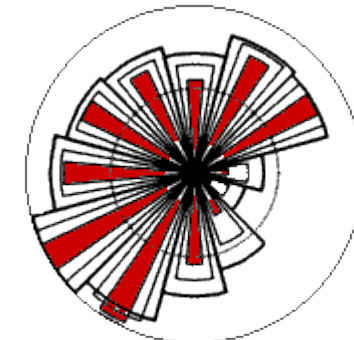
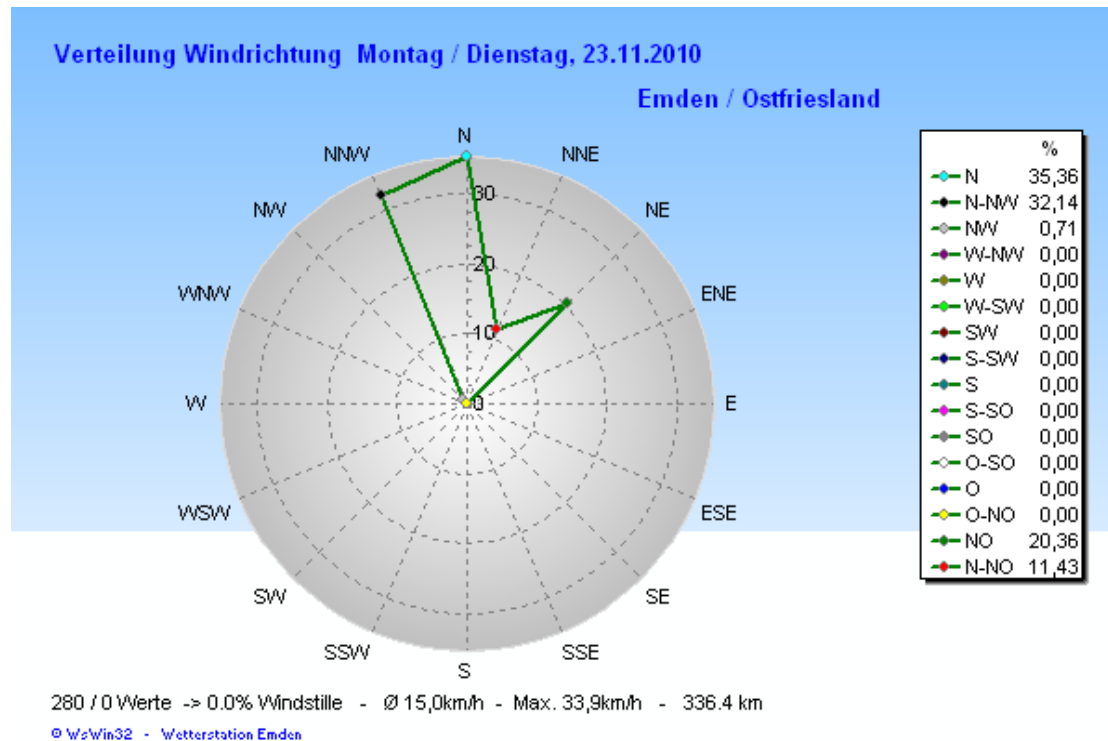
Europäischer Windatlas / Windatlas BW

Datensatz Sylt / BW

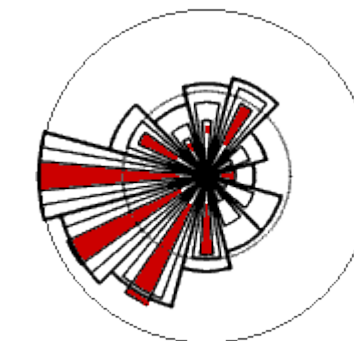


Windverteilung

Wetterstation Emden / Windpower.org



© 1998 www.WINDPOWER.org



© 1998 www.WINDPOWER.org

Simulationsmodelle

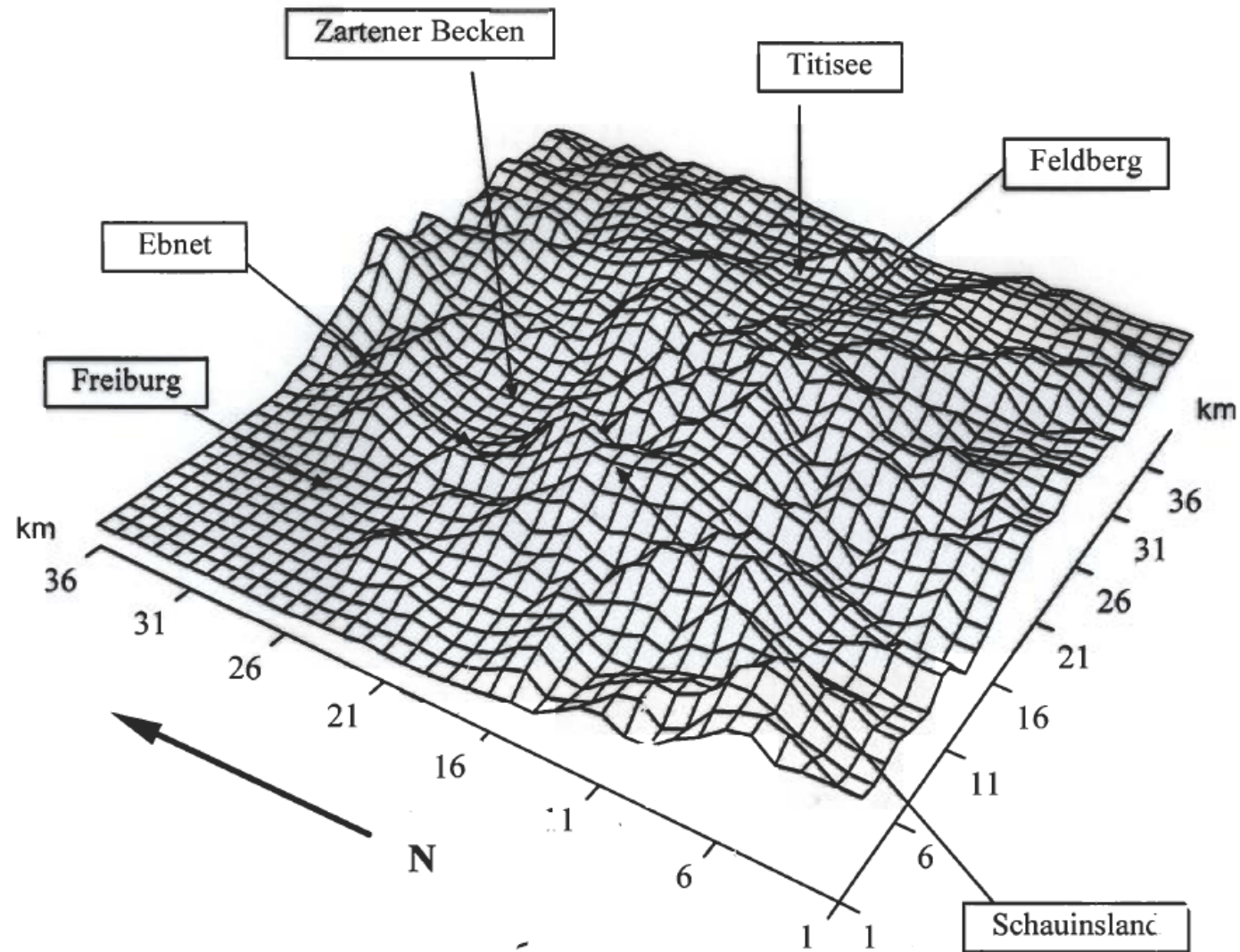
Skalenbereiche

Skalenbereiche	Längendimension	Zeitdimension	Typische Phänomene
Makroskala	α > 10.000 km	bis zu einem Jahr	Planet. Wellen
	β 2.000 - 10.000 km		Antizyklonen
Mesoskala	α 200 - 2.000 km	> 1 Tag	Hurrican
	β 20 - 200 km	1 h - 1 Tag	Land- Seewind
	γ 2 - 20 km	einige Min. - Std.	Berg- Talwind
Mikroskala	α 200 m - 2 km	bis zu 1 Stunde	Hangwinde
	β 20 - 200 m	in Minutenbereich	Tornado
	γ < 20 m	bis zu 1 Minute	Staubwirbel



Physikalische Gesetzmäßigkeiten des 3-dimensionalen Rechenmodells MEMO (Mesoskaliges Modell)

- Impulserhaltung
- Massenerhaltung
- Erhaltungssätze für skalare Größen
 - Temperatur (1. HS Thermodynamik)
 - Luftfeuchte
 - Turbulenzenergie
 - ...

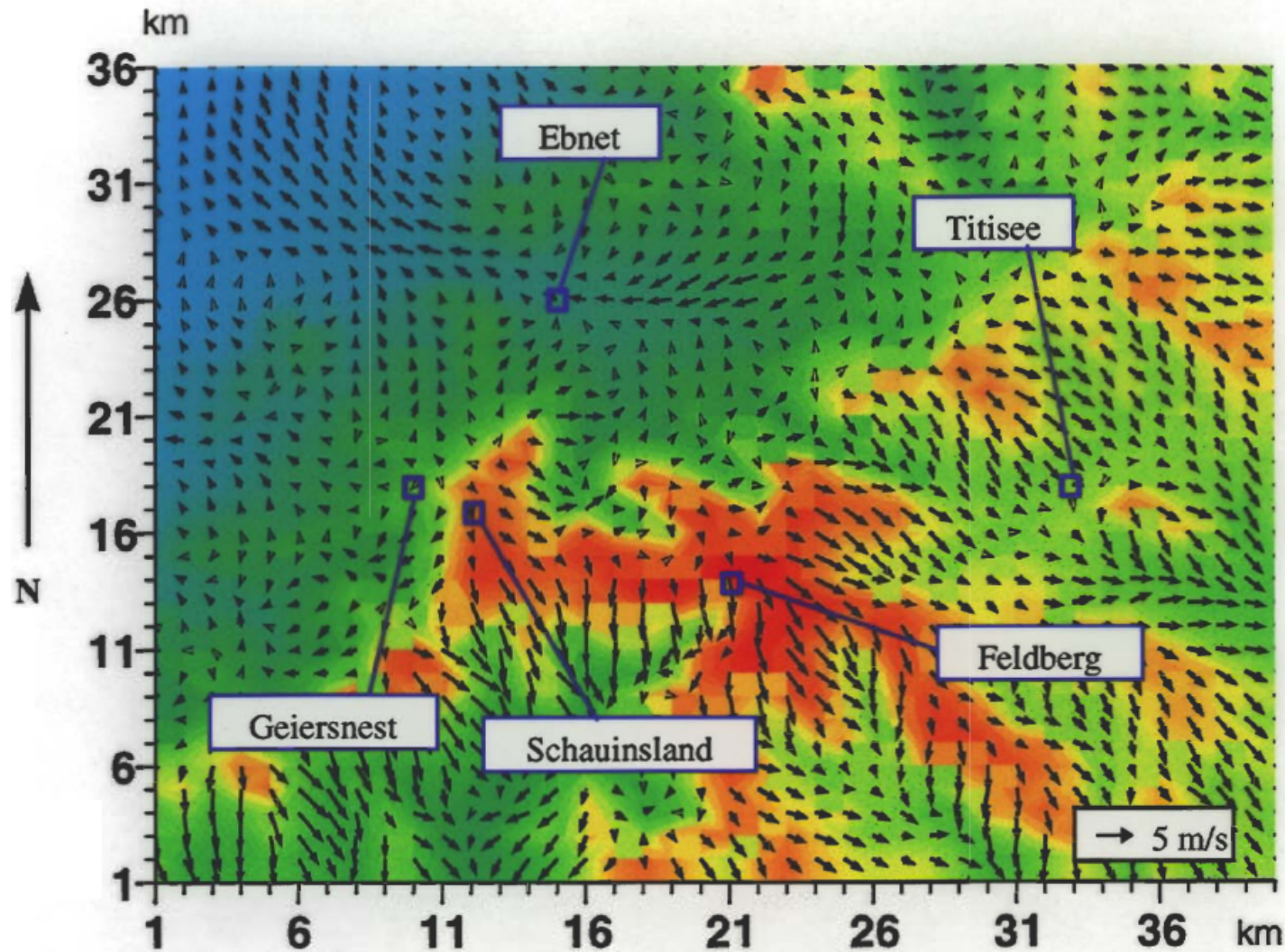


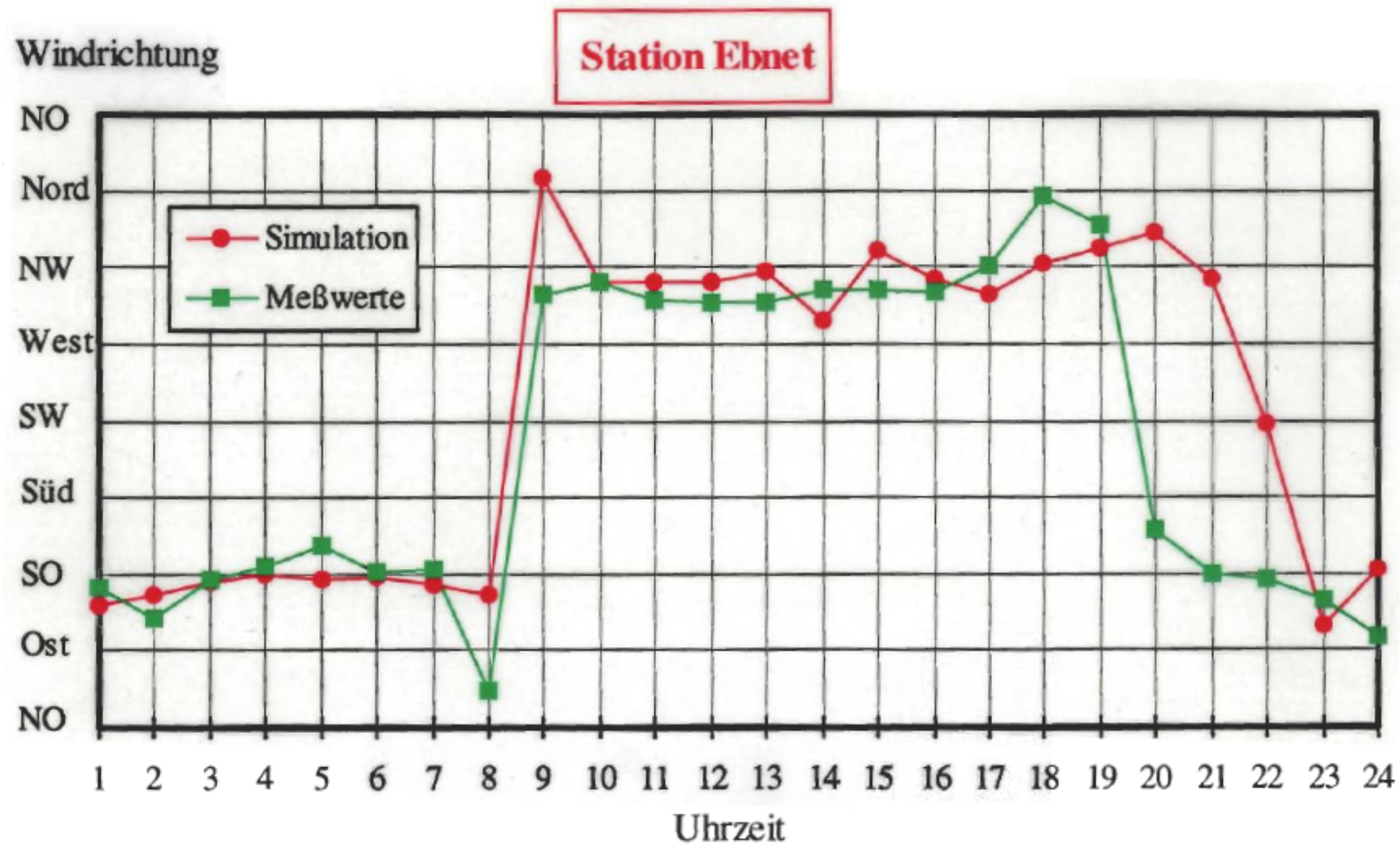


EIFER

Simulationsmodelle

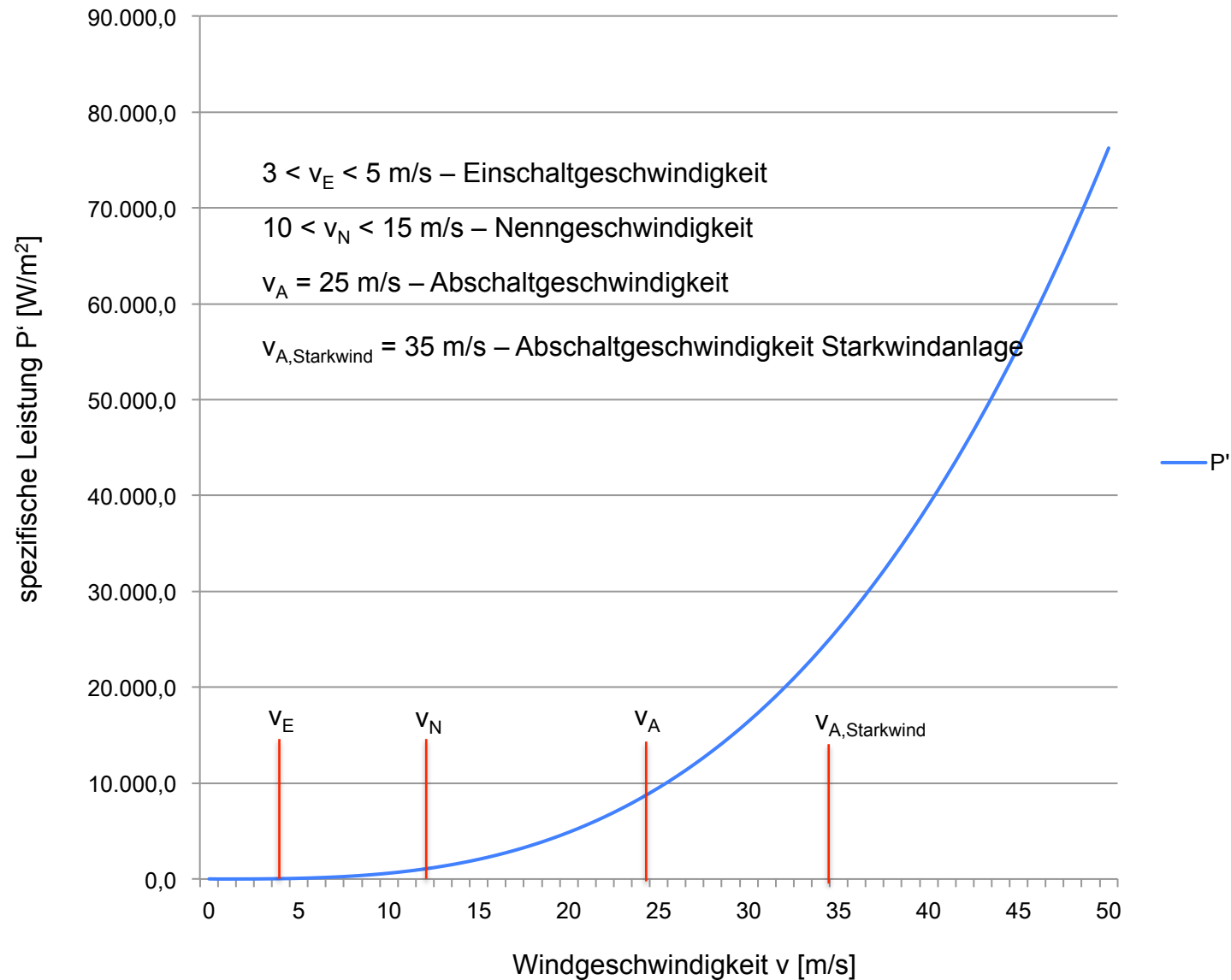
10 m - 01:00 Uhr





Spezifische Leistung des Windes

P'



Beaufort Skala

Stärke in Bft.	Bezeichnung Windstärke	km/h	kn	m/s	mph
0	Windstille	0 – <1	0 – <1	0 – 0,2	0 – 1,1
1	leiser Zug	1 – 5	1 – 3	0,3 – 1,5	1,2 – 4,5
2	leichte Brise	6 – 11	4 – 6	1,6 – 3,3	4,6 – 8,0
3	schwacher Wind	12 – 19	7 – 10	3,4 – 5,4	8,1 – 12,6
4	mäßiger Wind	20 – 28	11 – 15	5,5 – 7,9	12,7 – 18,3
5	frischer Wind	29 – 38	16 – 21	8,0 – 10,7	18,4 – 25,2
6	starker Wind	39 – 49	22 – 27	10,8 – 13,8	25,3 – 32,1
7	stelfer Wind	50 – 61	28 – 33	13,9 – 17,1	32,2 – 39,0
8	stürmischer Wind	62 – 74	34 – 40	17,2 – 20,7	39,1 – 47,1
9	Sturm	75 – 88	41 – 47	20,8 – 24,4	47,2 – 55,1
10	schwerer Sturm	89 – 102	48 – 55	24,5 – 28,4	55,2 – 64,3
11	orkanartiger Sturm	103 – 117	56 – 63	28,5 – 32,6	64,4 – 73,5
12	Orkan	ab 118	ab 64	ab 32,7	ab 73,6

© Meteomedia