

Modul: Atmosphärische Skalen in Raum und Zeit

Lernziel:

Erstes Einordnen der verschiedenen atmosphärischen Prozesse nach ihren charakteristischen Größenordnungen, Definition der typischen dynamischen Skala in Raum und Zeit, Einführung charakteristischer Maßzahlen und dimensionsloser Kenngrößen.

Keywords: Skalendiagramm
Energiedissipation
Kolmogorov-Gesetz
Richardson-Gerade
Spektrale Energieverteilung
Dimensionslose Kennzahlen

Beispiele atmosphärischer Bewegungsformen

Staubteufel: Kleinräumige Turbulenz



Schwerewellen: Kelvin-Helmholtz-Wellen



Gewitterwolke: Konvektiver Scale



Tornado: Konvektiver Scale



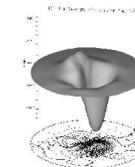
Hurrican: Mesoscale und synoptischer Scale



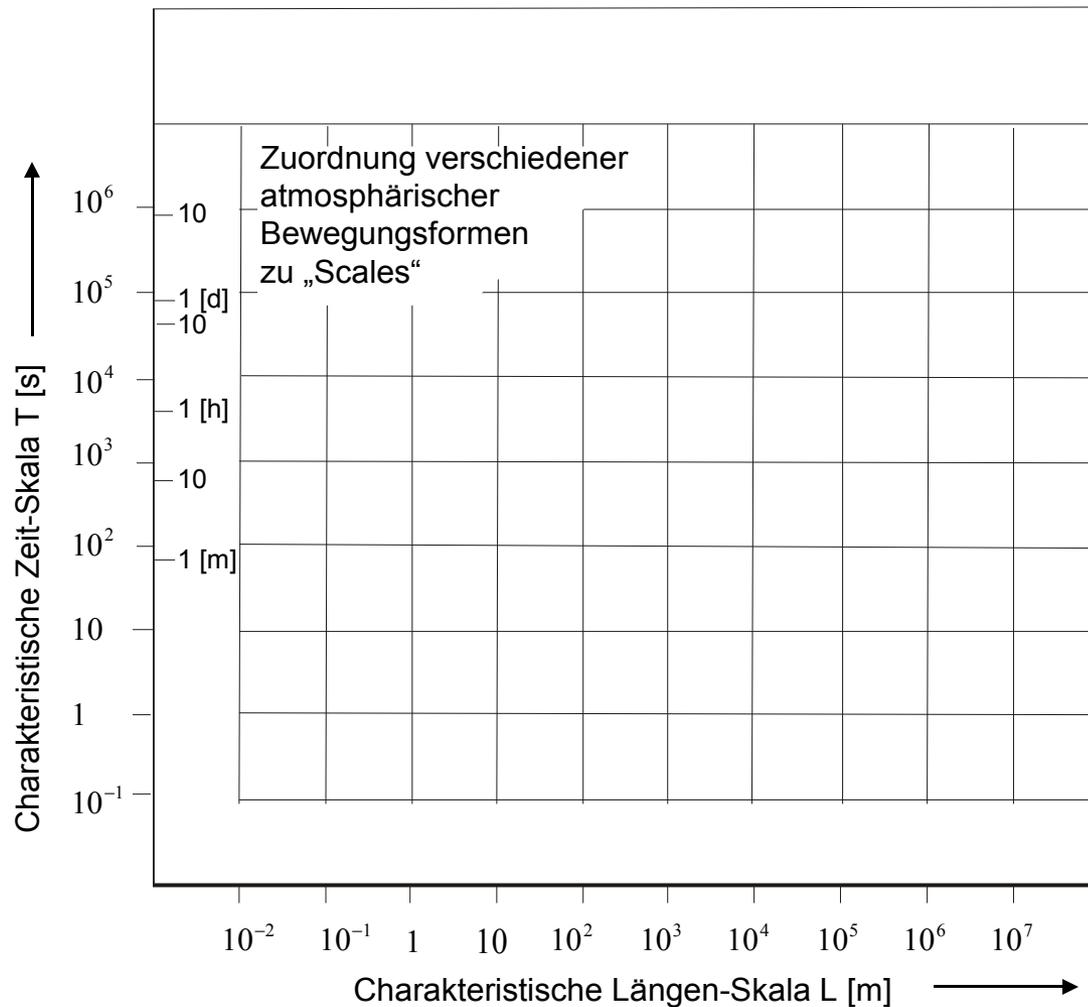
Tiefdruckgebiet: Synotischer Scale



Stratosphärischer Polarwirbel: Planetarischer Scale



Skalendiagramm der Atmosphäre



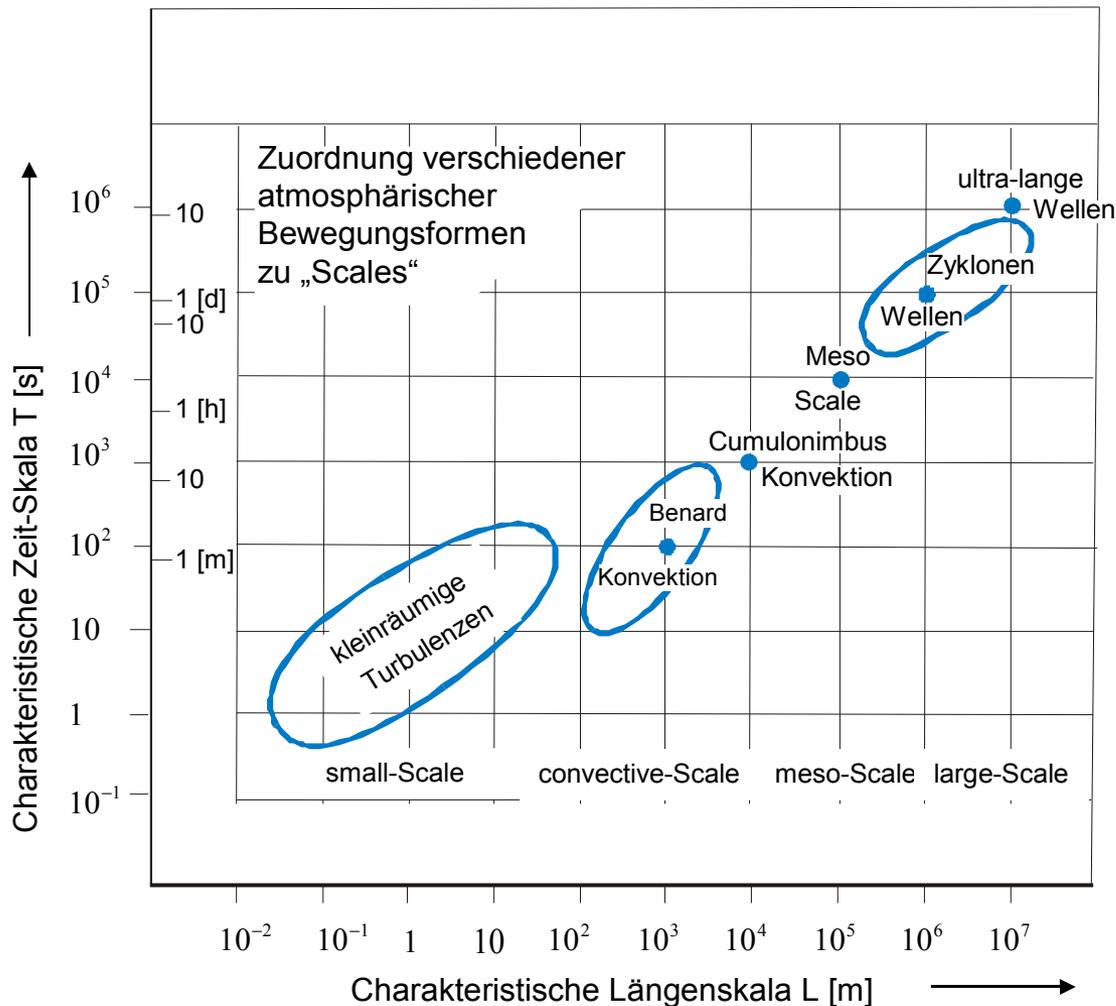
Ordnungsprinzip

L Längenskala:
Wellenlänge
Radius

T Zeitskala:
Periode
Lebensdauer

$$V = L/T; \quad K \approx 0,2LV; \quad \text{Richardson: } K \approx 0,5L^{4/3}; \quad V \approx 2,5L^{1/3}; \quad T \approx 0,4S^{2/3}$$

Skalendiagramm der Atmosphäre



$$V = L/T; \quad K \approx 0,2LV; \quad \text{Richardson: } K \approx 0,5L^{4/3}; \quad V \approx 2,5L^{1/3}; \quad T \approx 0,4S^{2/3}$$

Einordnung der atmosphärischen Bewegungsformen und Prozesse in Raum und Zeit

- Kleinräumiger Scale
- Konvektiver Scale
- Meso-Scale
- Synoptischer Scale
- Planetarischer Scale

Raumskala und Zeitskala sind nicht unabhängig voneinander.

Die Bewegungsformen ordnen sich angenähert auf einer Geraden an.

Zusammenhang von Raum und Zeit

Die diversen Bewegungsformen in der Atmosphäre liegen nicht etwa chaotisch verteilt in dem Skalendiagramm. Es gibt ein Ordnungsschema. Je größer die charakteristische Längenskala umso größer ist auch die charakteristische Zeitskala.

Dies liegt an der größeren Trägheit und Lebensdauer, die die räumlich größeren Phänomene in der Atmosphäre haben. Wir können diesen Sachverhalt zunächst durch die angenäherte Konstanz einer charakteristischen Geschwindigkeit U ausdrücken.

Definition: Charakteristische Geschwindigkeit

$$U = \frac{L}{T} \quad \longrightarrow \quad U \approx 10 \frac{m}{sec}$$

Ein genauerer Zusammenhang ergibt sich mit Hilfe der Energiedissipation!

Kolmogorov-Gesetz der Energiedissipation

Kolmogorov: Die Energiedissipation ist über alle Skalenbereiche konstant und bestimmt den Zusammenhang zwischen den atmosphärischen Größenordnungen in Raum und Zeit.

$$\epsilon = \frac{U^2}{T} = \frac{L^2}{T^3} = \text{const.}$$

ϵ : Energiedissipation L : Charakteristische Längenskala
 $U = L/T$: Geschwindigkeit T : Charakteristische Zeitskala

Lebensdauer und Zeit der Vorhersagbarkeit

Länge	Vorhersagezeit	Phänomen
1m	12 s	Turbulenzwirbel
10 m	1 min	Staubteufel
100 m	5 min	Cumuluswolke
1 km	20 min	Schauer
10 km	1.5 h	Gewitter, Tornado
100 km	7.5 h	Land-See-Wind
1000 km	1.5 d	Zyklone, Hurrican
10000 km	7 d	Planetarische Welle

$$\varepsilon = 5 \cdot 10^{-4} \frac{m^2}{s^3}$$

$$T = \frac{L^{2/3}}{\varepsilon^{1/3}}$$

Die Lebensdauer der Phänomene und die Zeit der Vorhersagbarkeit sind ungefähr identisch!

Turbulenter Diffusionskoeffizient

Gradient-Fluss-Beziehung

$$\mathbf{J}_e = e \mathbf{v} = K \nabla e$$

\mathbf{J}_e : Turbulenter Fluss der Eigenschaft e

∇e : Gradient der Eigenschaft e

\mathbf{v} : Transportgeschwindigkeit

K : Turbulenter Diffusionskoeffizient

$$K = UL = \frac{L^2}{T}$$

Dimension : $K = \left[\frac{m^2}{\text{sec}} \right]$

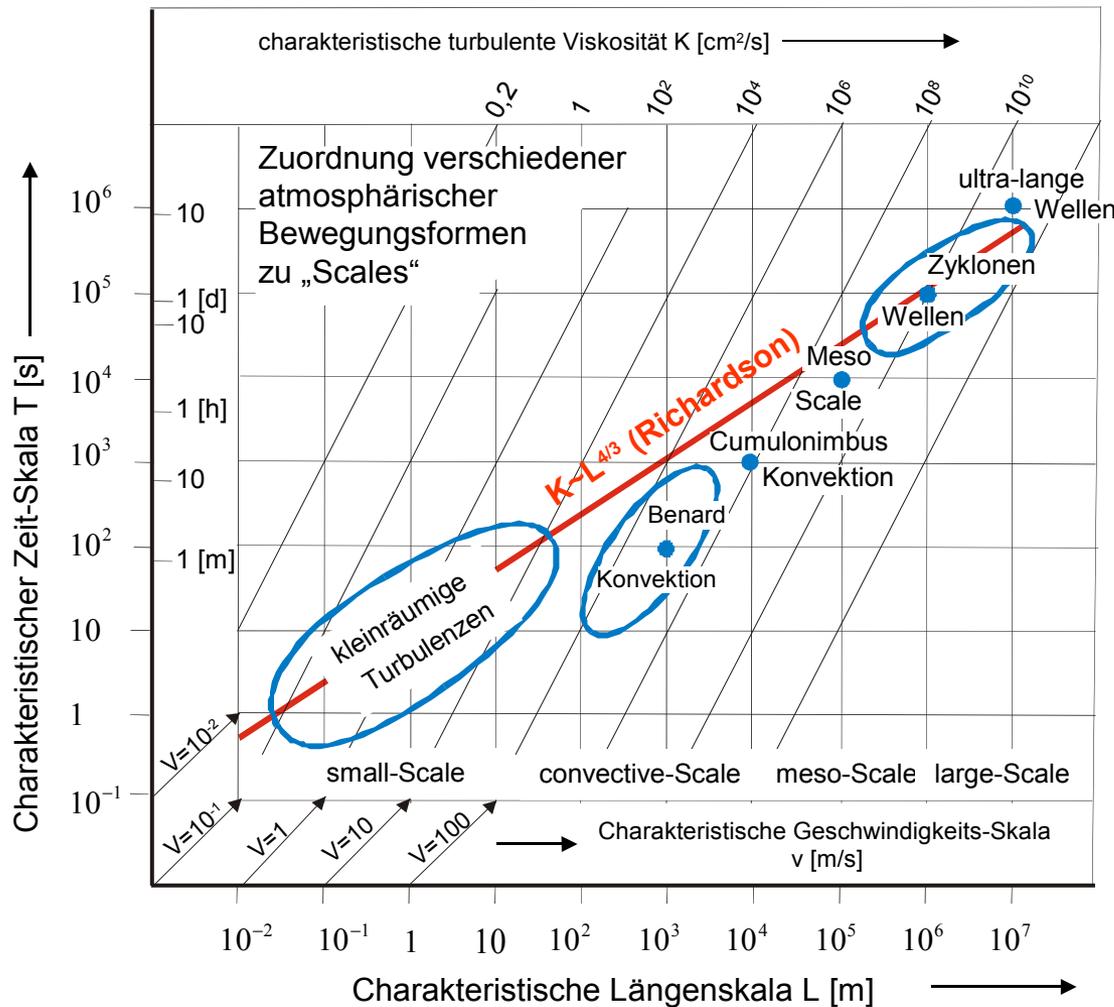
Richardson-Gerade und turbulente Diffusion

Allgemein: $K = f(L, T) = \frac{L^2}{T}$ Kolmogorov: $T = \frac{L^{2/3}}{\varepsilon^{1/3}}$

Richardson: $K = \varepsilon^{1/3} L^{4/3}$

Entlang den Linien gleicher Energiedissipation ist der turbulente Diffusionskoeffizient allein eine Funktion der charakteristischen Länge der verschiedenen Bewegungsformen in der Atmosphäre! In dem doppelt logarithmischen Skalen-Diagramm ergibt sich somit die sogenannte Richardson-Gerade mit der Steigung 4/3.

Skalendiagramm der Atmosphäre



Entlang der Richardson-Gerade ist die massenspezifische Energiedissipation konstant!

Hier ist der turbulente Diffusionskoeffizient nur eine Funktion der charakteristischen Länge!

$$V = L/T; \quad K \approx 0,2LV; \quad \text{Richardson: } K \approx 0,5L^{4/3}; \quad V \approx 2,5L^{1/3}; \quad T \approx 0,4S^{2/3}$$

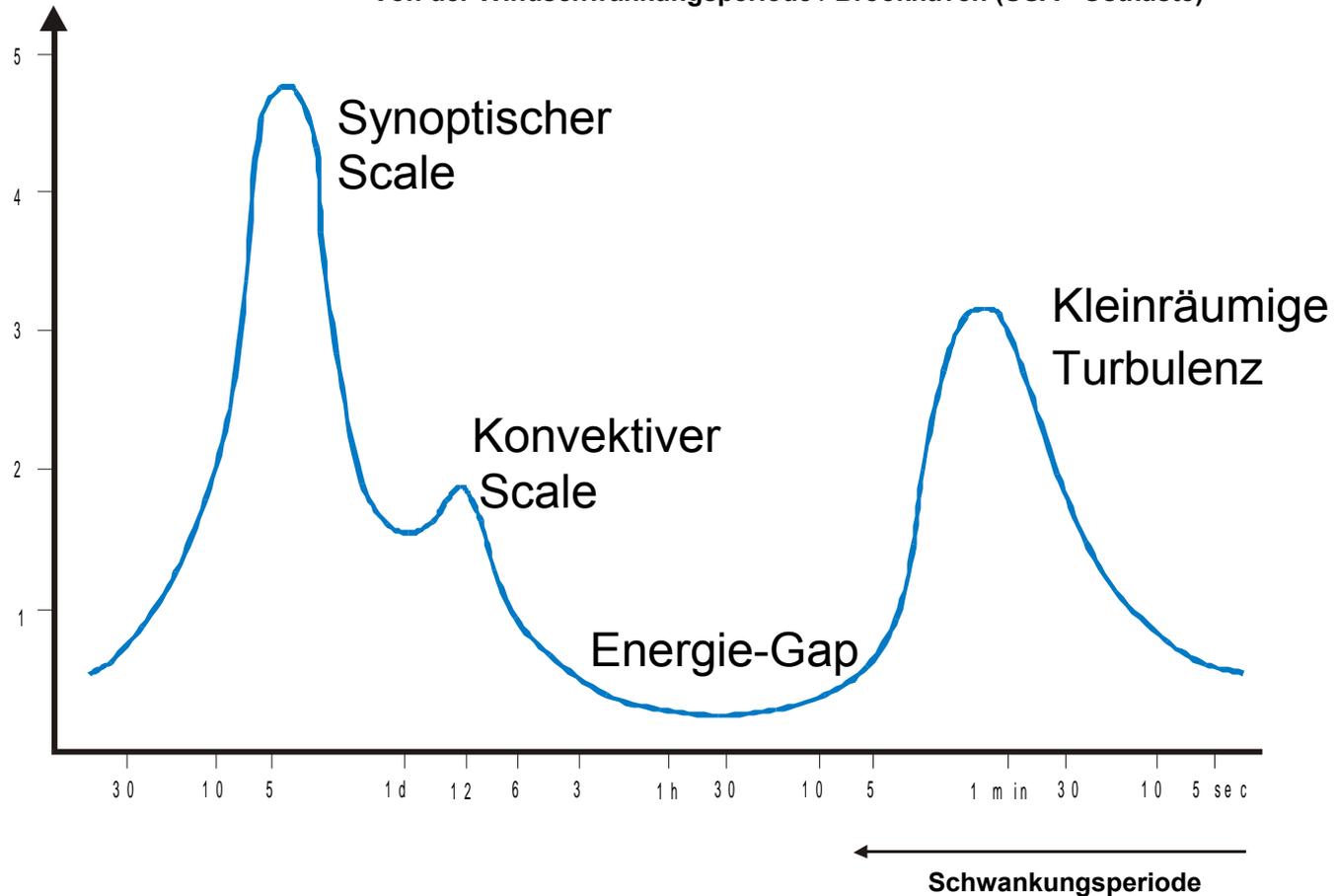
Spektrale Energieverteilung in der Atmosphäre

Spektrale
Energiever-
teilung
[m²/s]

Beispiel für ein zeitliches Energiespektrum der Atmosphäre

Spektrale Energieverteilung des Winters in Abhängigkeit

Von der Windschwankungsperiode / Brookhaven (USA - Ostküste)



Klassische Bereiche der Meteorologie

Synoptische Dynamik:

Dynamik der planetarischen Grenzschicht:

Konvektion / Schwerewellen

Übungen zum Modul

Schätzen Sie mit Hilfe der Energiedissipation die maximale Vorhersagezeit eines Gewitters in den mittleren Breiten ab.

Die gesamte kinetische Energie der Atmosphäre beträgt 10^9 J, der mittlere Druck der Atmosphäre beträgt 1013 hpa. Wie groß ist die Masse m der Atmosphäre und welche charakteristische Geschwindigkeit ergibt sich über alle Skalenbereiche der Atmosphäre hinweg?

Zusammenfassung / Merksätze

- Die konstante Energiedissipation bestimmt den Zusammenhang zwischen der charakteristischen Längenskala und der Zeitskala atmosphärischer Prozesse.
- Lebensdauer und Vorhersagbarkeit der atmosphärischen Bewegungsformen sind von gleicher Größenordnung.
- Entlang den Linien gleicher Energiedissipation ist der turbulente Diffusionskoeffizient allein eine Funktion der charakteristischen Länge der verschiedenen Bewegungsformen in der Atmosphäre.
- Maxima der spektralen Energiedichte gibt es in der synoptischen Skala und im Bereich der kleinräumigen Turbulenz, sowie räumlich und zeitlich variabel im konvektiven Bereich. Bei 10 Minuten liegt das Energiegag. Dies kann für eine Mittelung der synoptischen Variablen genutzt werden.