

Einführung in die Meteorologie und Geophysik

Teil 1 – Meteorologie
Lisa Schielicke

Organisatorisches

Vorlesung: montags, 12-14 Uhr – Großer Hörsaal, Auf dem Hügel (AdH) 20

Übung: mittwochs 11-13 Uhr – Hörsaal IV, Meckenheimer Allee (MA) 176

- **Teil 1** (7 Wochen): **Einführung in die Meteorologie** (Vertr.-Prof. Dr. Lisa Schielicke)
Tutorin: B.Sc. Viola Dost → Korrektur der Übungszettel, Unterstützung via Email
- **Teil 2** (7 Wochen, Start: Mi, 30.11.): **Einführung in die Geophysik** (Dr. Anna Zoporowski)
Tutorin: Larissa Reineccius → Durchführen der Mi-Übung, Korrektur der Übungszettel
- 7.12.2022 ist Dies Academicus → keine Veranstaltung

Jeder Teil schließt mit einer **60-minütigen Klausur** ab (Termine werden noch bekannt gegeben), Gesamtnote = arithmetisches Mittel beider Klausuren

- **1. Klausur (Meteorologie):** Montag, 28.11.2022, 12:00 Uhr, Großer Hörsaal, AdH 20
- **2. Klausur (Geophysik):** Mittwoch, 01.02.2023, 11:30 HS IV, MA 176
- Nachklausur (Meteorologie+Geophysik): tba, voraussichtlich Anfang März
- **WICHTIG: Zur Prüfung in BASIS spätestens 1 Woche vor dem Termin anmelden**

Zulassungsvoraussetzung zur Klausur: $\geq 50\%$ der Hausaufgaben richtig gelöst

Literaturhinweise (Teil 1 - Meteorologie)

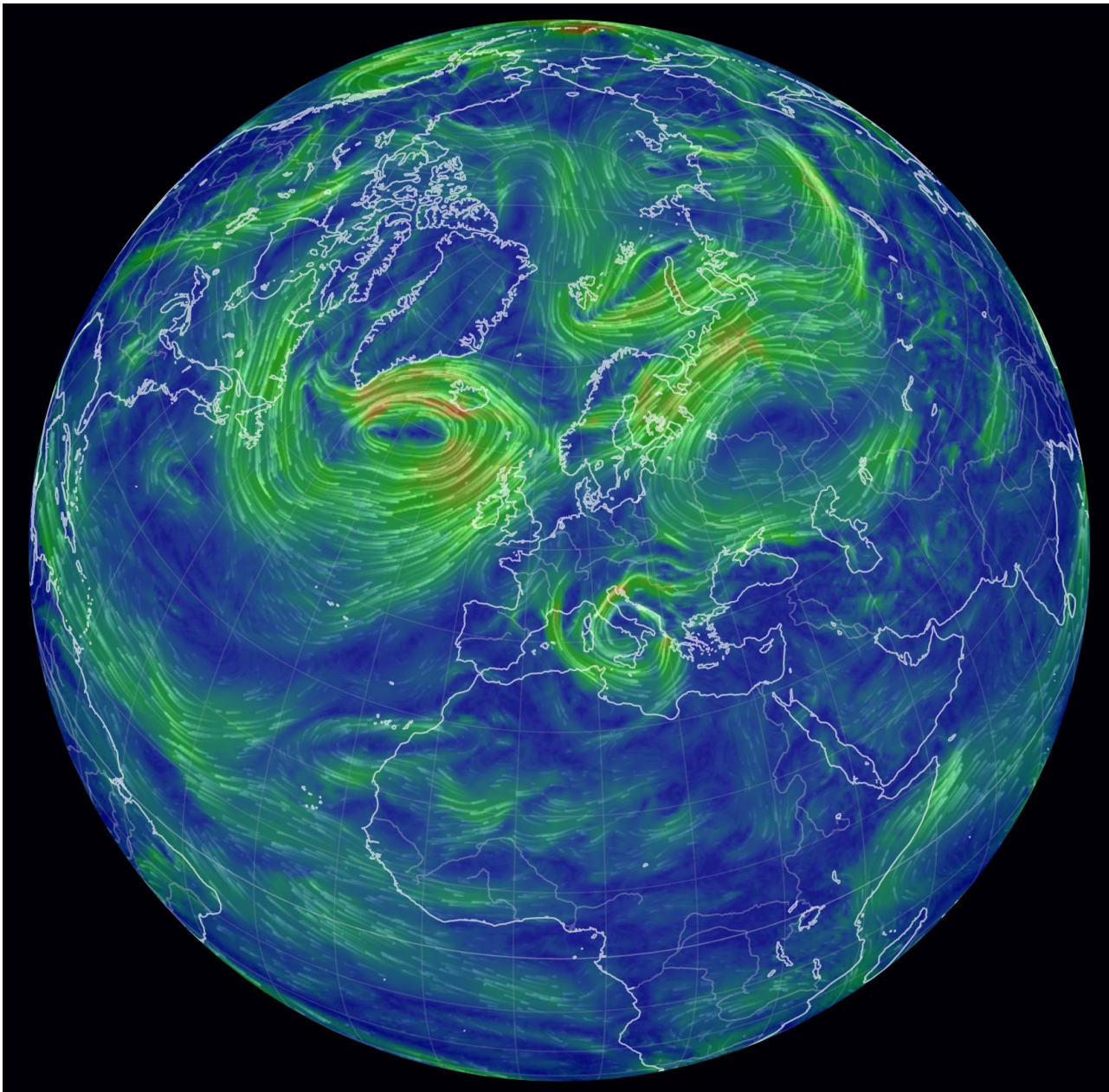
- Kraus, H. (2004). *Die Atmosphäre der Erde: Eine Einführung in die Meteorologie*. 3. erweiterte und aktualisierte Auflage. Springer-Verlag.
- Häckel, H. (2016). *Meteorologie*. UTB.
- Klose, B. (2016). *Meteorologie: eine interdisziplinäre Einführung in die Physik der Atmosphäre*. Springer-Verlag.
- Diese Bücher sind über <https://www.ulb.uni-bonn.de/de> und **bonus - das Suchportal der Universität** zu finden und können als pdf heruntergeladen werden oder ausgeliehen werden.

Vorlesungsinhalte

- Allgemeine Einführung und Skalenbetrachtung
- Zusammensetzung und vertikaler Aufbau der Atmosphäre
- Atmosphärische Zustandsvariablen (Druck, Wind, Temperatur, Feuchte)
- Strahlung
- Thermodynamik der Atmosphäre
- Dynamik und zweidimensionale Windsysteme
- Synoptik
- Allgemeine Zirkulation und Klimatologie

Lernziele

- Einblick in die Themengebiete der Meteorologie
- Kennenlernen meteorologischer Variablen, Konzepte und Grundbegriffe
- Einführung in meteorologisch-physikalische Denkweise
- Erstes Verständnis atmosphärischer Prozesse und Zustände



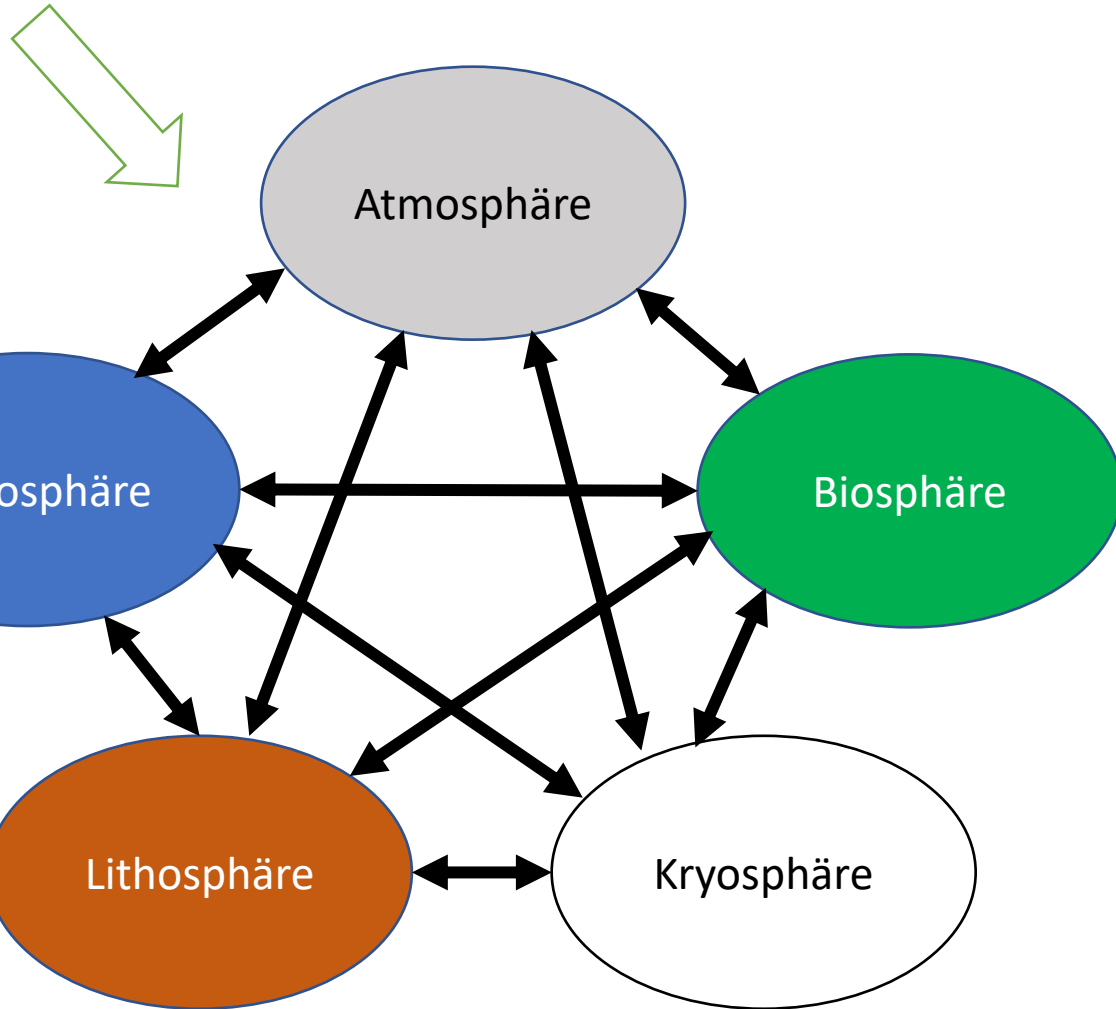
Womit beschäftigt sich die Meteorologie?

Verständnis, Analyse, Vorhersage der physikalischen und chemischen Prozesse, die in der Atmosphäre ablaufen einschließlich der Wechselwirkungen mit den anderen Komponenten des Klimasystems Erde und des Weltalls.

Strömungsfeld und Windgeschwindigkeit (farbig, kleine Geschwindigkeiten sind blau, höhere in rot) in 850 hPa.

Quelle: <https://earth.nullschool.net/> (Aufruf: 7.10.2021)

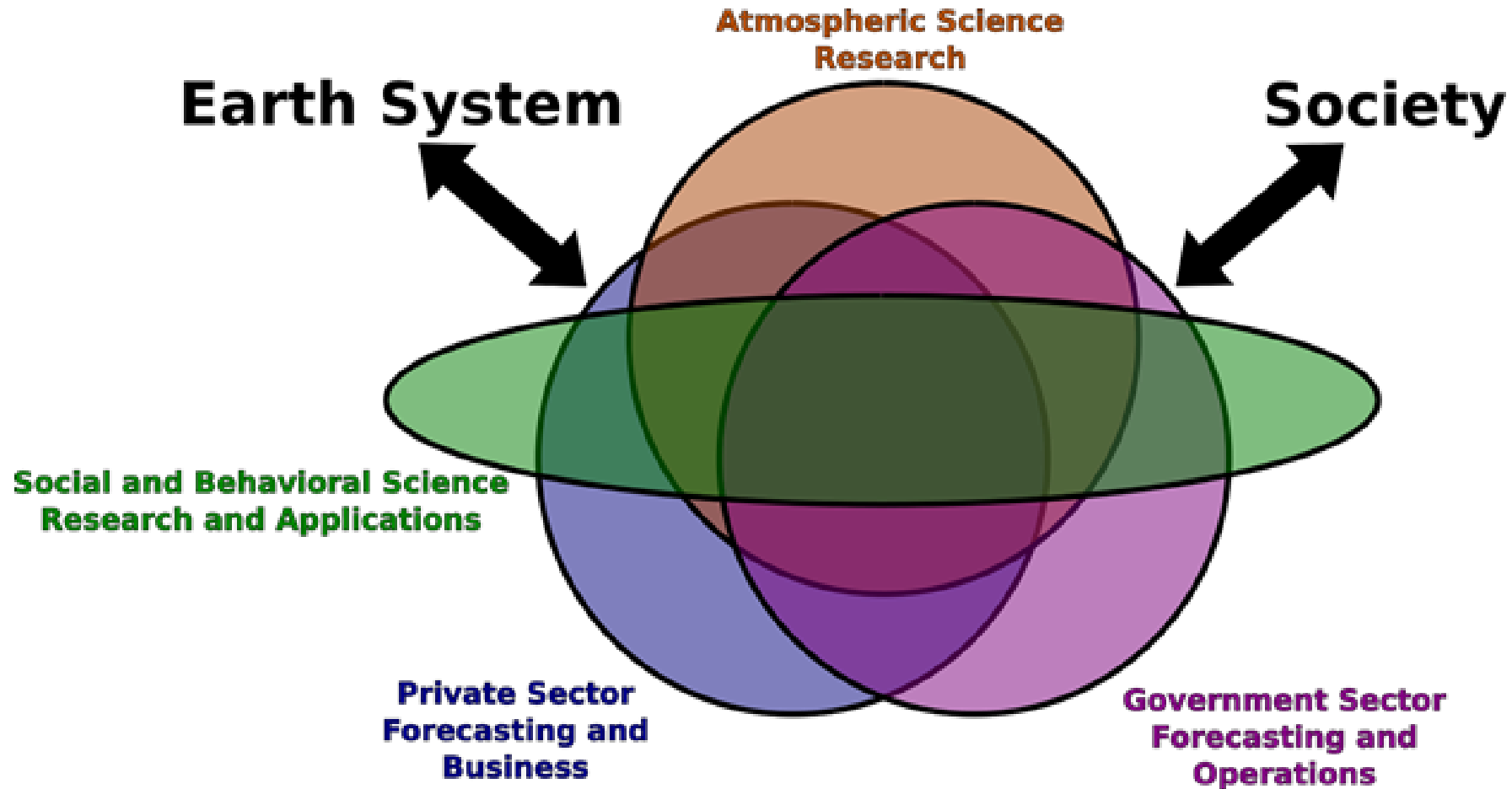
Externe Einflüsse



Womit beschäftigt sich die Meteorologie?

Verständnis, Analyse, Vorhersage der physikalischen und chemischen Prozesse, die in der Atmosphäre ablaufen einschließlich der Wechselwirkungen mit den anderen Komponenten des Klimasystems Erde und des Weltalls.

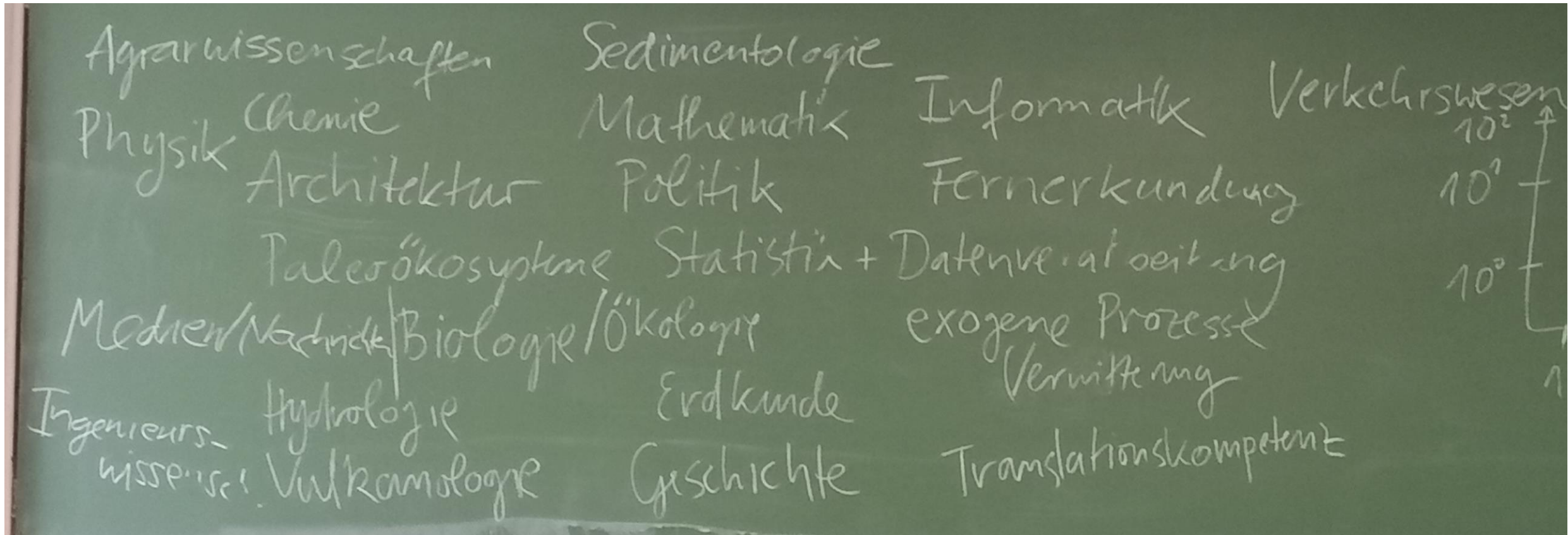
Arbeitsgebiete der Meteorologie



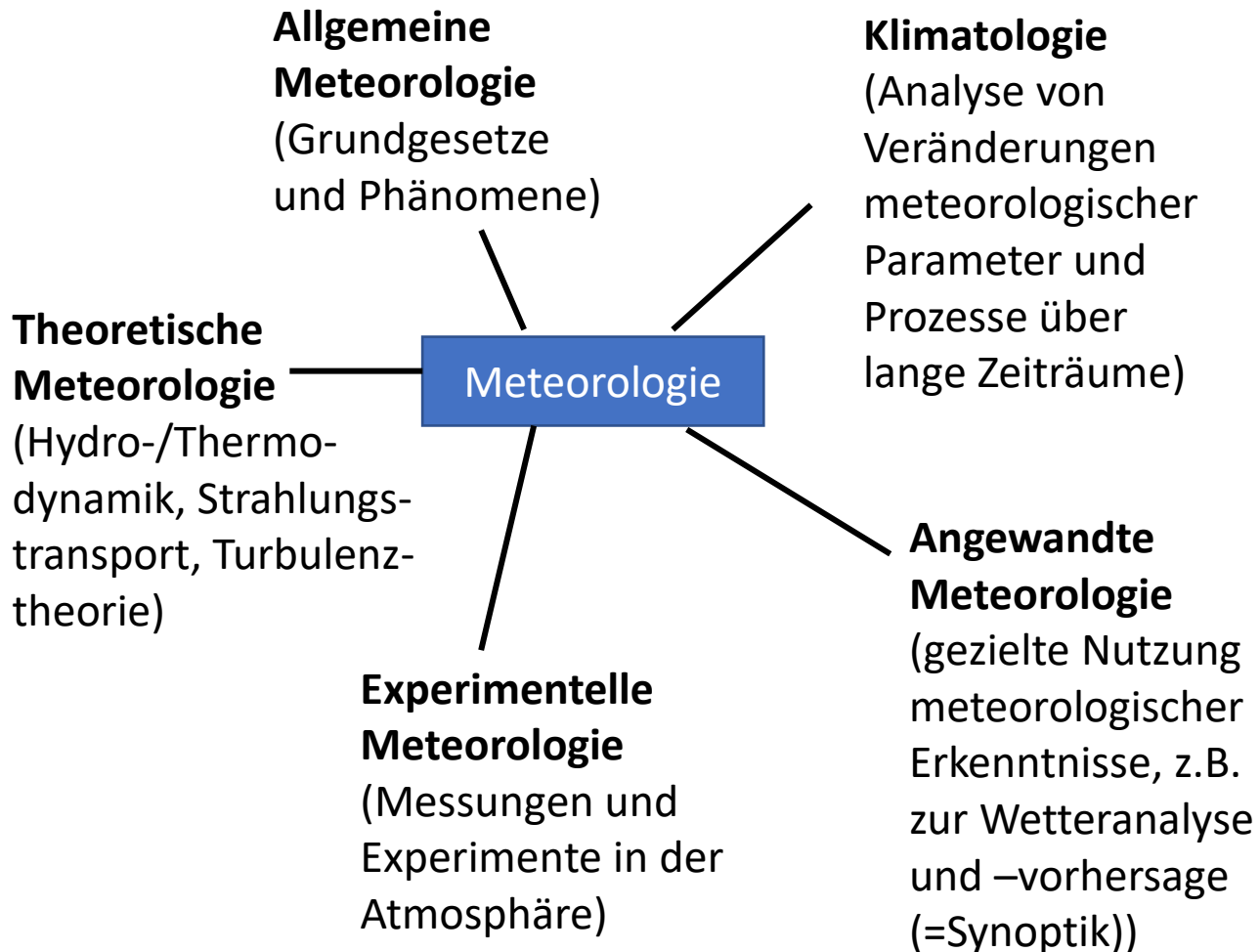
Quelle: <https://www.ametsoc.org/ams/index.cfm/about-ams/ams-statements/statements-of-the-ams-in-force/bachelor-s-degree-in-atmospheric-science/> (Letzter Aufruf 11.10.2021)

Welche Fächer sind mit Arbeitsgebieten der Meteorologie verknüpft?

Überlegen Sie bitte gemeinsam mit Ihren Kommiliton*innen, welche Fächer für die Meteorologie wichtig sein könnten?
Wir werden Ihre Überlegungen anschließend hier sammeln.



Einteilung der Meteorologie



Einteilung nach spezifischen Räumen:

- Grenzschichtmeteorologie (bodennahe Luftschicht bis ca 2 km)
- Mikrometeorologie (unterste Meter)
- Maritime/Alpine/Glaziale/Polare/Mittlere Breiten/Tropische Meteorologie (Meteorologie über bestimmten Regionen)

Weitere Einteilung ...

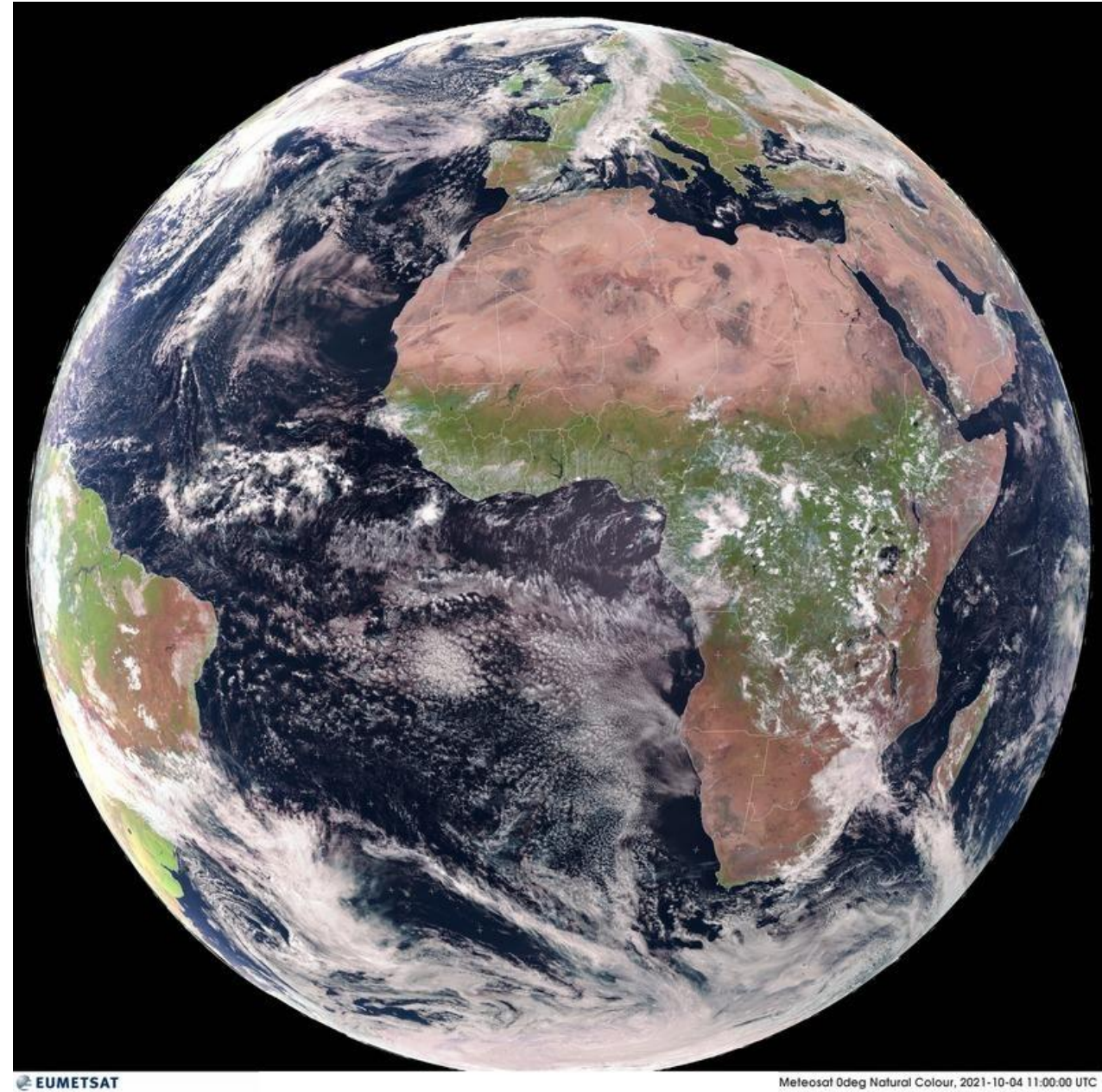
- ... **nach spezifischen Raumskalen** (z.B. Meso-, regionale, Mikro-Meteorologie)
- ... **nach experimentellen Techniken** (Satelliten-, Radar-, Lidar-Meteorologie)
- ... **nach anderen Gesichtspunkten** (Energetik, Allgemeine Zirkulation, Wolkenphysik,...)

Skalenbetrachtungsweise

Atmosphärische Prozesse laufen auf unterschiedlichen Skalen ab.

Meteorologische Phänomene haben verschiedene typische horizontale Längenskalen L und typische Zeitskalen T .

Das kann zur Vereinfachung der meteorologischen Grundgleichungen und Entwicklung einfacher Modelle genutzt werden.



Skalendiagramm

Kleinräumige Turbulenz: z.B. Staubteufel, kleinere Turbulenzwirbel in der Grenzschicht



© Steve Jurvetson; <https://cloudatlas.wmo.int/>

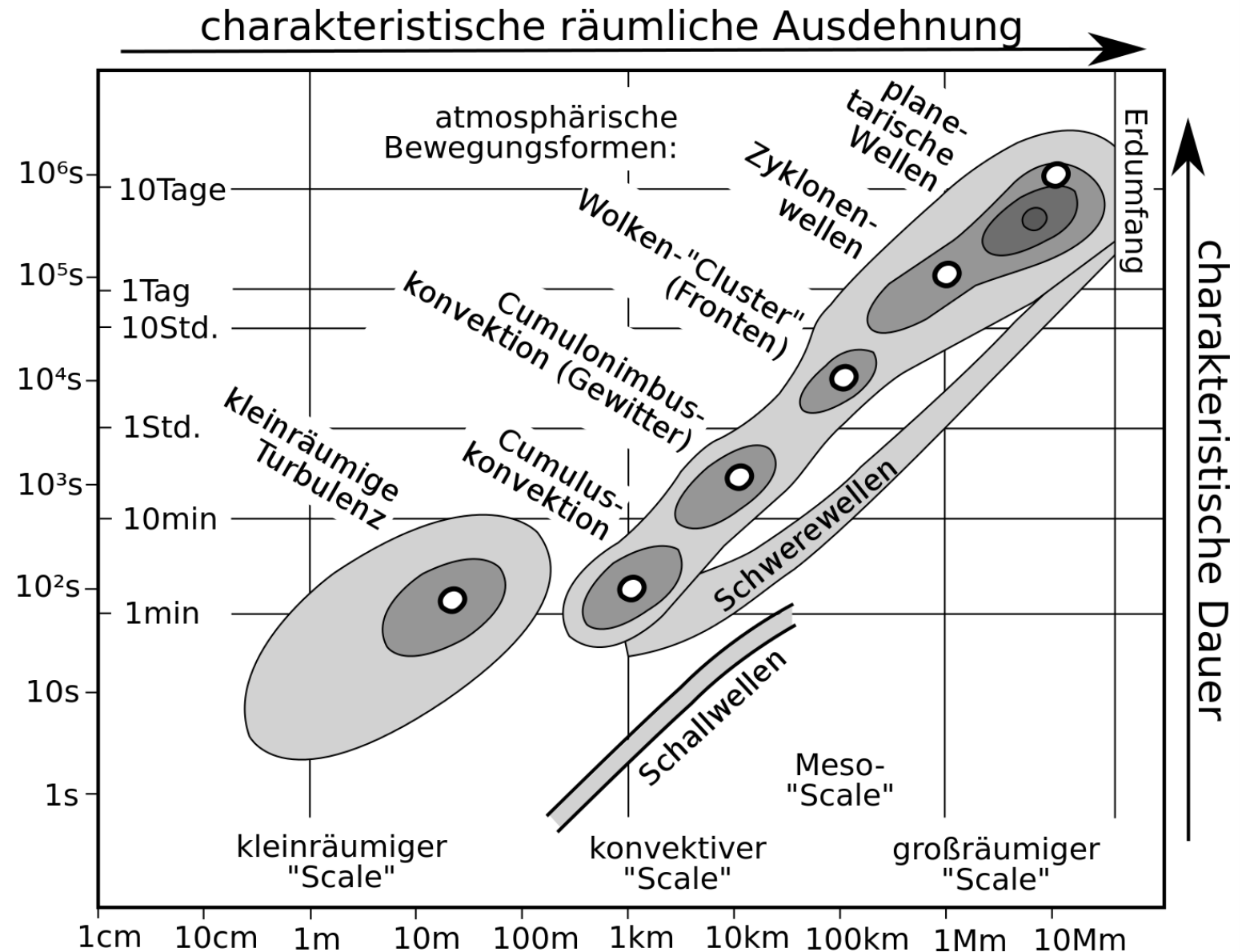


Abb.: „Atmosphärische Bewegungen und ihre typischen Ausdehnungen in Raum und Zeit nach Heinz Fortak: Meteorologie. 2 Auflage. Reimer, 1982, [ISBN 978-3496005063](https://doi.org/10.1007/978-3-496-00506-3)“. Quelle: [Mahgue](https://doi.org/10.1007/978-3-496-00506-3) / [CC BY-SA 3.0](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/)

Skalendiagramm

Cumuluskonvektion: kleinere Wolken, z.B.
Cumulus humilis (Haufenwolke)



© Frank Le Blancq; <https://cloudatlas.wmo.int/>

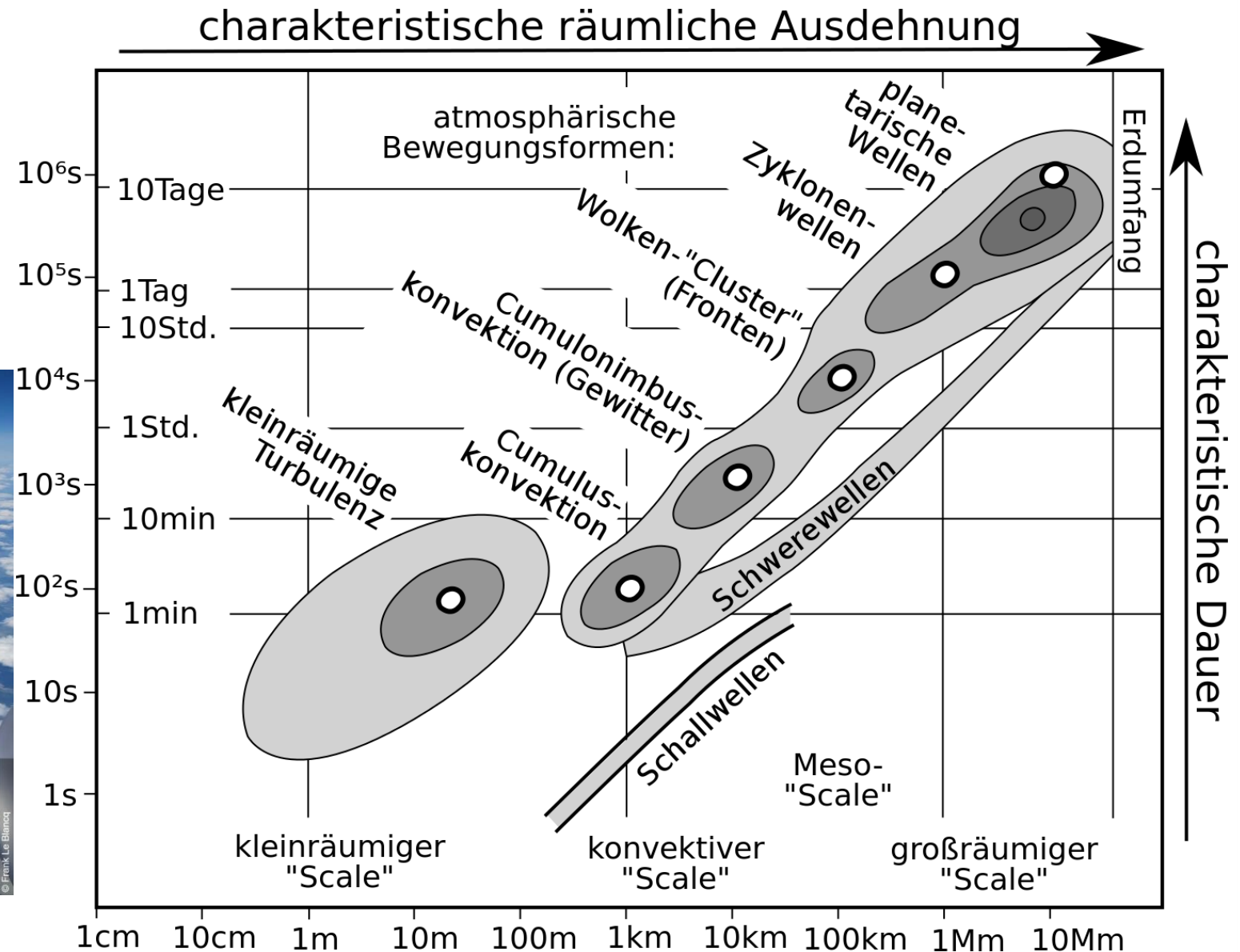


Abb.: „Atmosphärische Bewegungen und ihre typischen Ausdehnungen in Raum und Zeit nach Heinz Fortak: Meteorologie. 2 Auflage. Reimer, 1982, [ISBN 978-3496005063](https://www.reimer-verlag.de/isbn/978-3496005063)“. Quelle: [Mahque](https://www.mahque.de/) / [CC BY-SA 3.0](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/)

Skalendiagramm

Cumulusnimbuskonvektion: Gewitter



© Matthew Clark; <https://cloudatlas.wmo.int/>

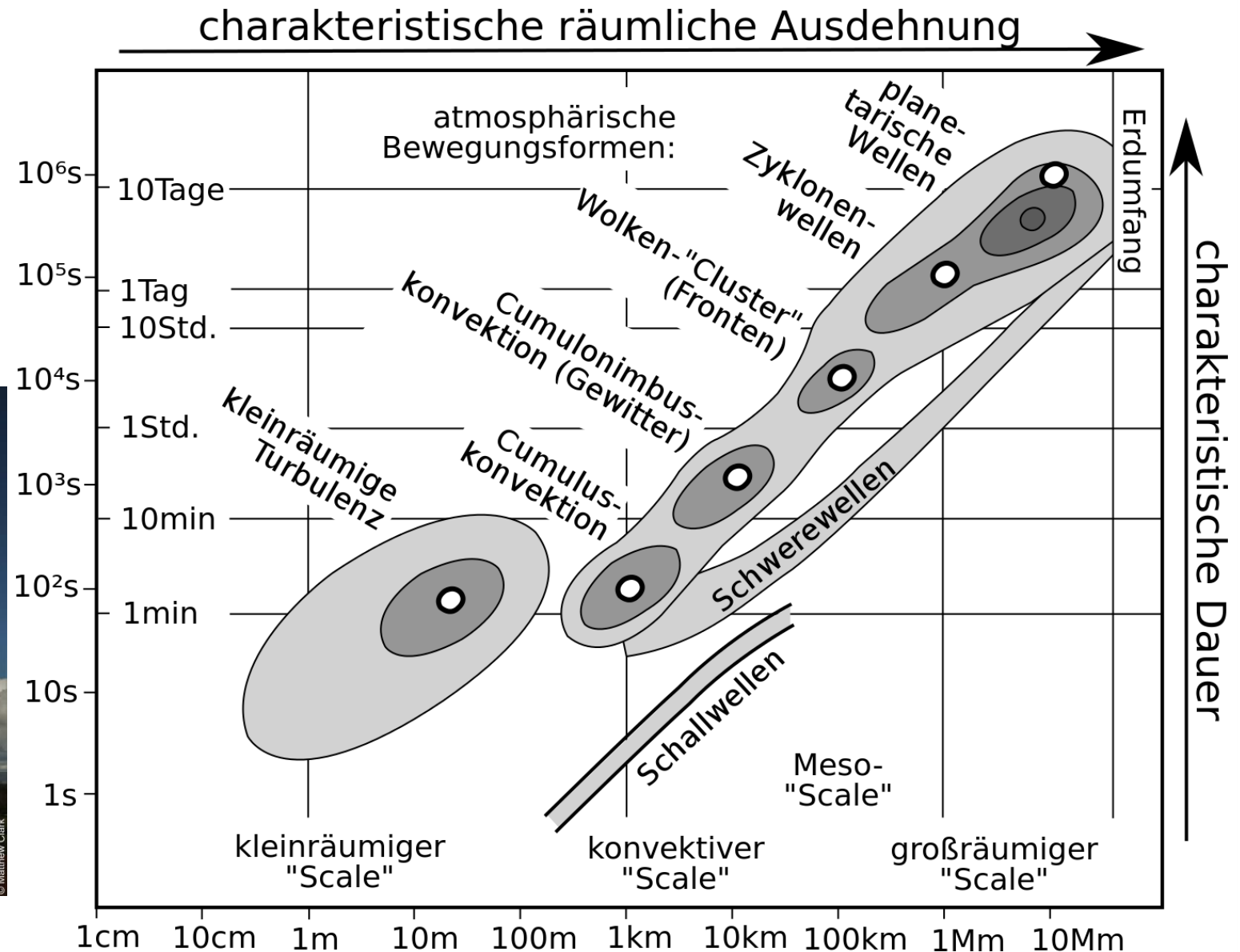


Abb.: „Atmosphärische Bewegungen und ihre typischen Ausdehnungen in Raum und Zeit nach Heinz Fortak: Meteorologie. 2 Auflage. Reimer, 1982, [ISBN 978-3496005063](https://www.reimer-verlag.de/ISBN-978-3496005063)“. Quelle: [Mahque](https://www.mahque.de/) / [CC BY-SA 3.0](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/)

Skalendiagramm

Cumulusnimbuskonvektion: Gewitter

© Antonio J. Galindo; <https://cloudatlas.wmo.int/>



© Matthew Clark; <https://cloudatlas.wmo.int/>

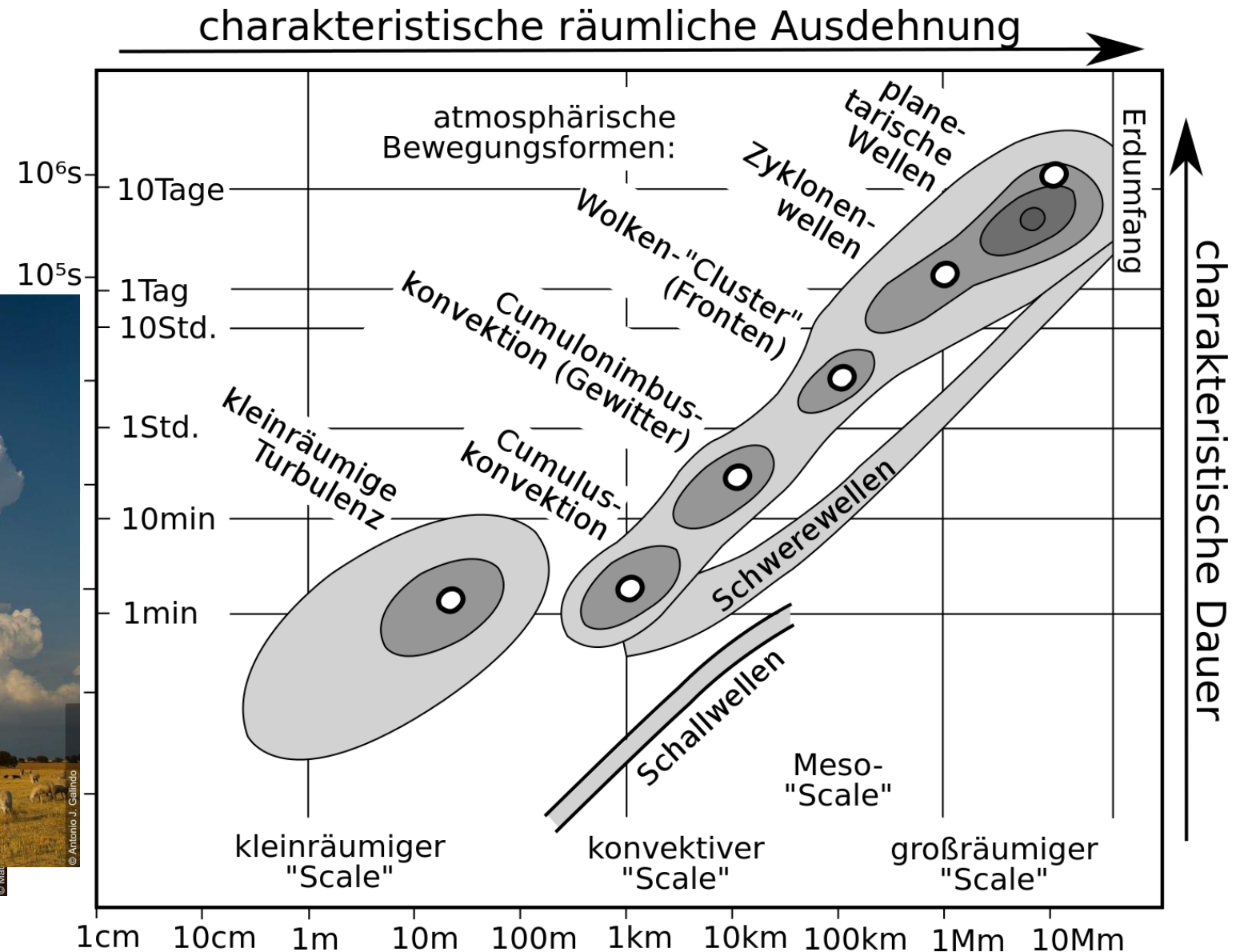
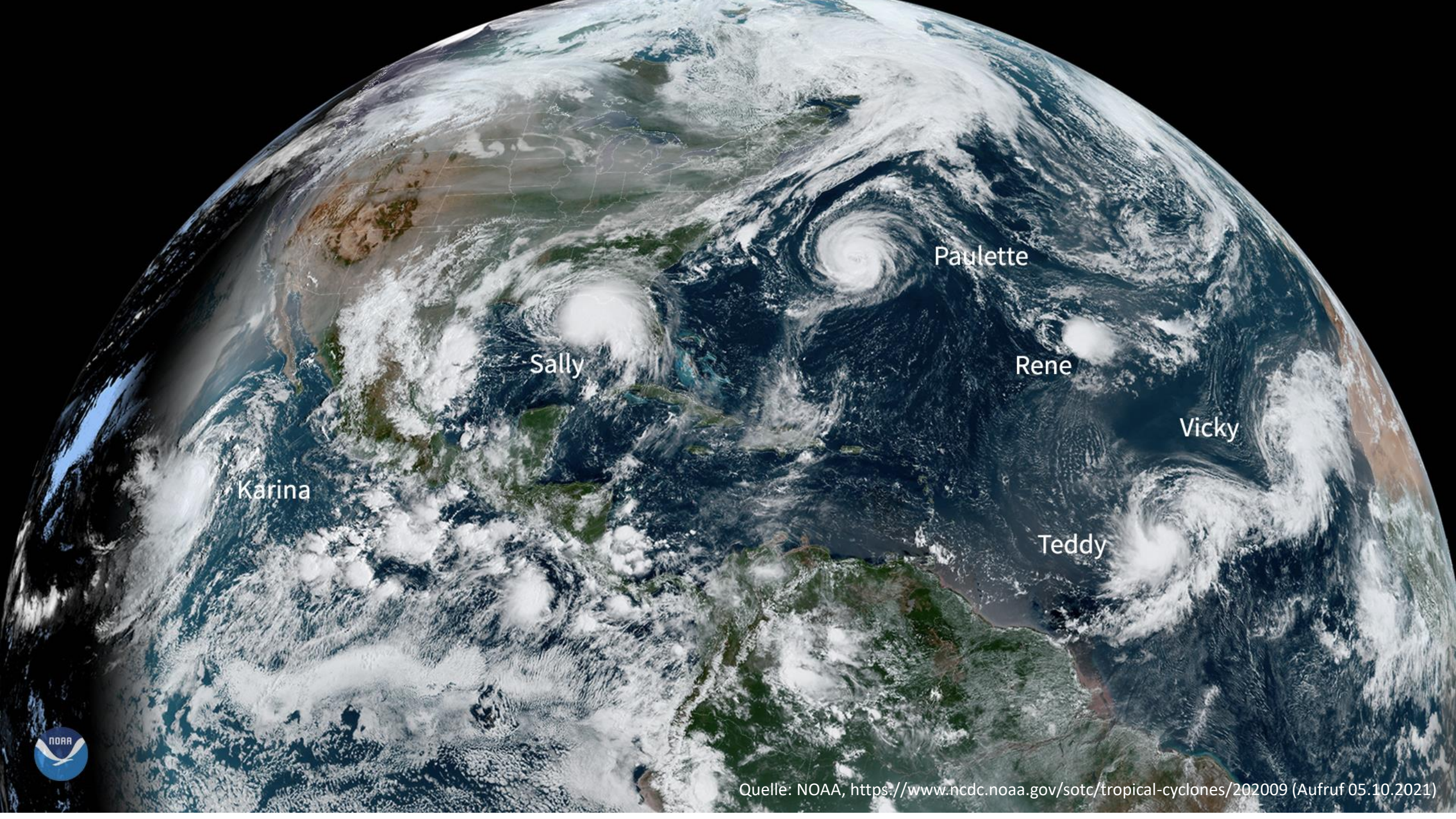


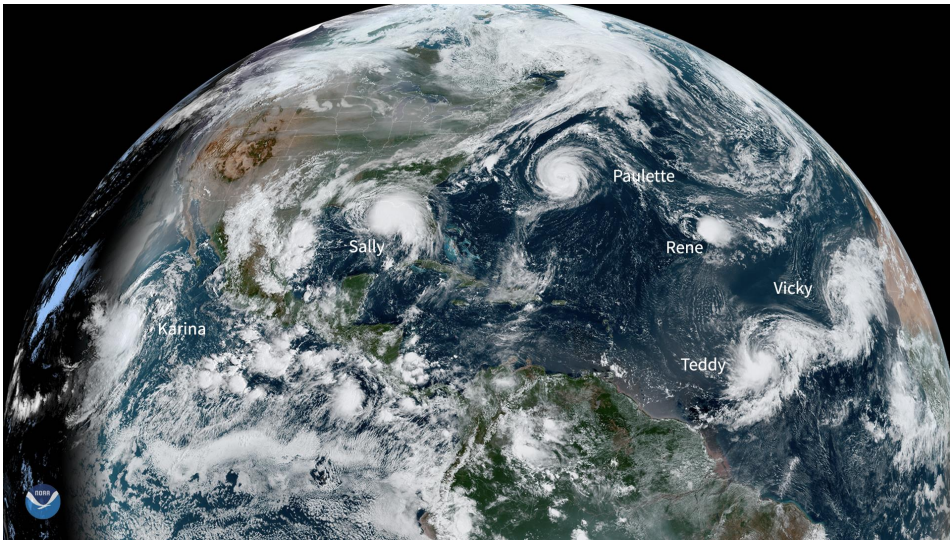
Abb.: „Atmosphärische Bewegungen und ihre typischen Ausdehnungen in Raum und Zeit nach Heinz Fortak: Meteorologie. 2 Auflage. Reimer, 1982, [ISBN 978-3496005063](https://doi.org/10.1007/978-3-496-00506-3)“. Quelle: [Mahgue / CC BY-SA 3.0](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/)



Quellè: NOAA, <https://www.ncdc.noaa.gov/sotc/tropical-cyclones/202009> (Aufruf 05.10.2021)

Skalendiagramm

Tropische Zyklonen, Fronten, Tiefs und Hochs der mittleren Breiten



Quelle: NOAA, <https://www.ncdc.noaa.gov/sotc/tropical-cyclones/202009> (Aufruf 05.10.2021)

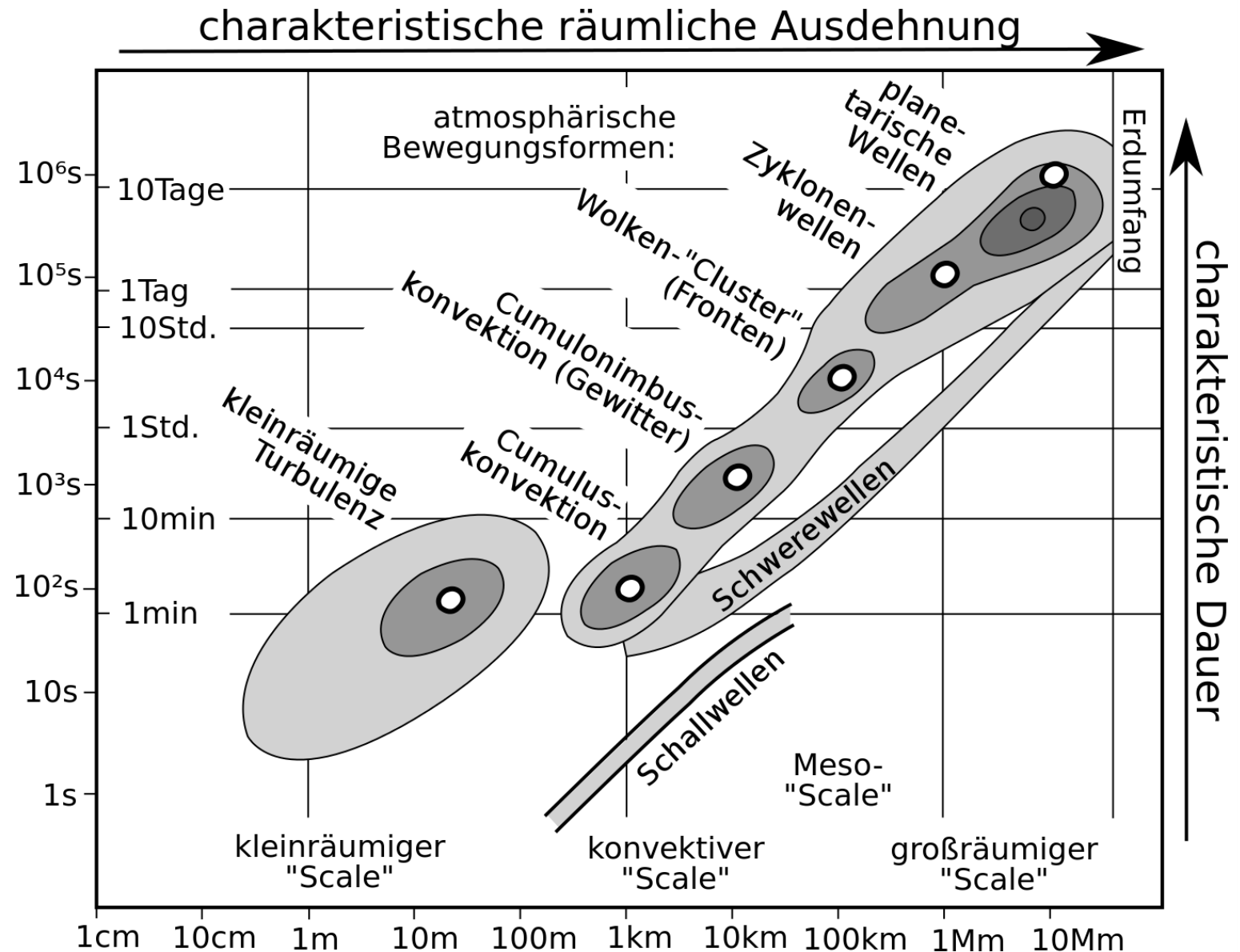


Abb.: „Atmosphärische Bewegungen und ihre typischen Ausdehnungen in Raum und Zeit nach Heinz Fortak: Meteorologie. 2 Auflage. Reimer, 1982, [ISBN 978-3-496-00506-3](https://www.reimer-verlag.de/ISBN-978-3-496-00506-3)“. Quelle: [Mahque](https://www.mahque.de/) / [CC BY-SA 3.0](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/)

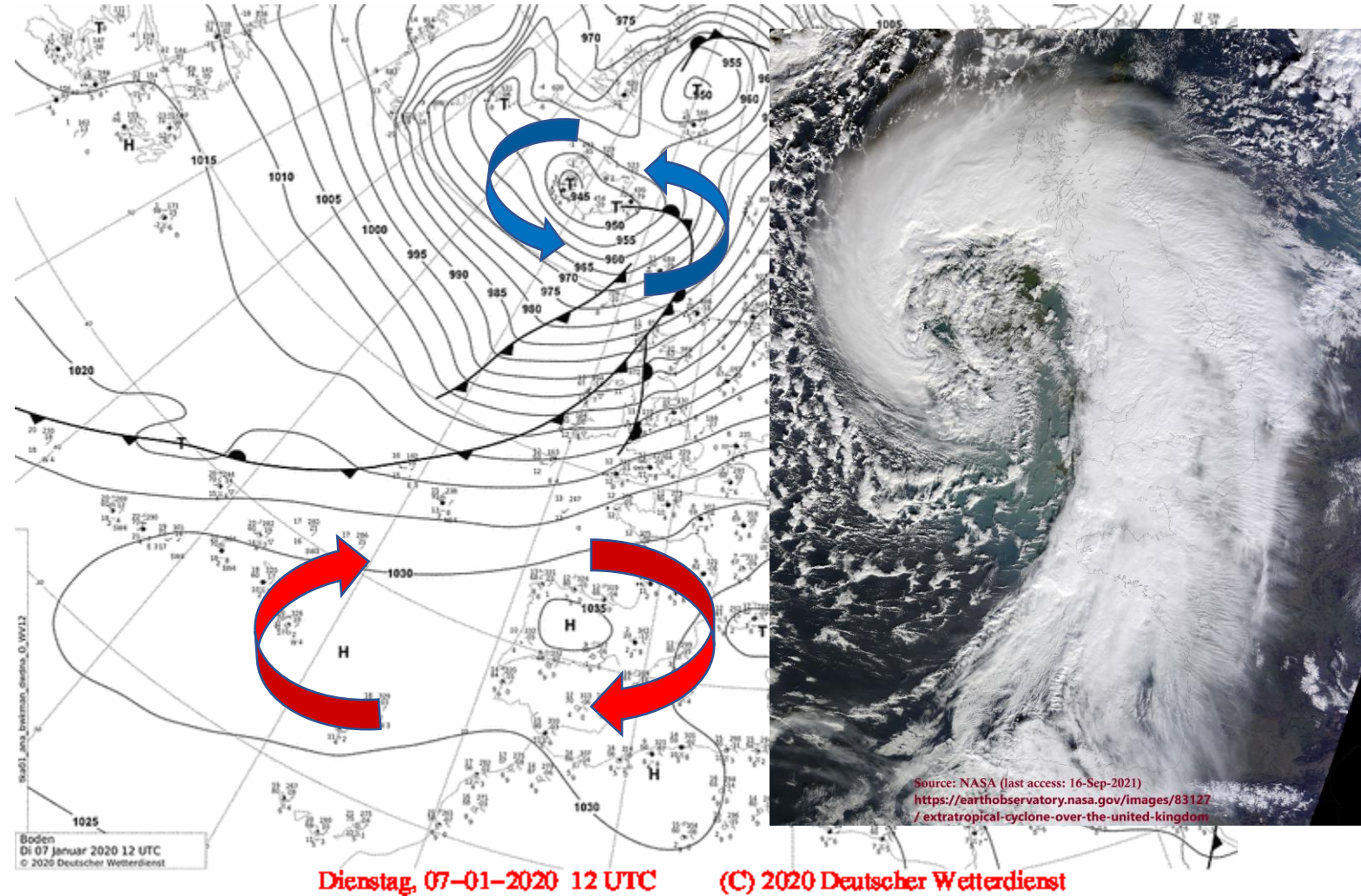
Hoch- und Tiefdruckgebiete der mittleren Breiten

Nordhemisphäre:

→ Hochdruckgebiete (Antizyklonen) werden immer im Uhrzeigersinn umströmt

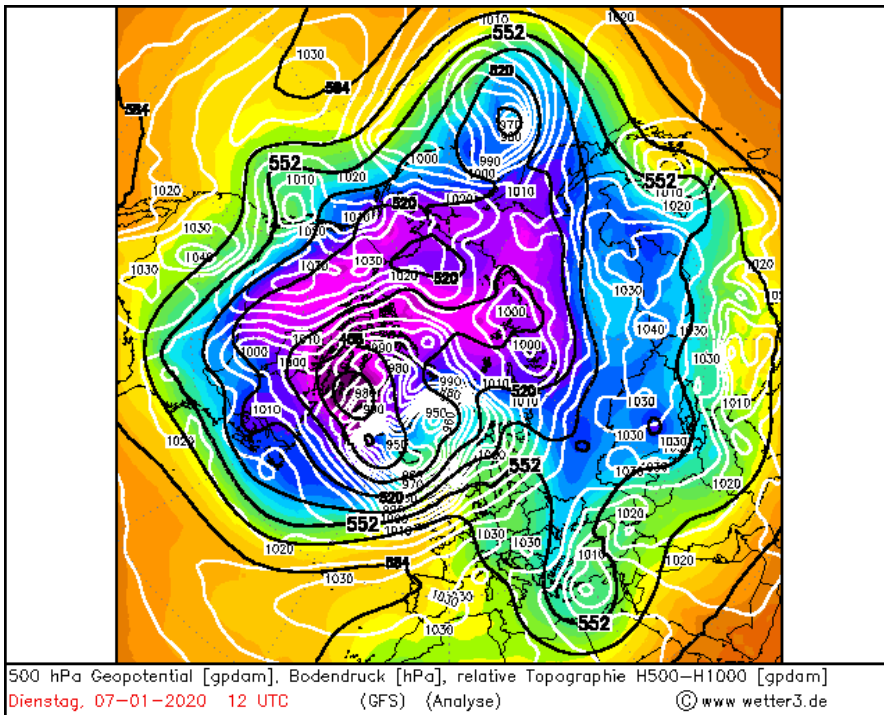
→ Tiefdruckgebiete (Zyklonen) werden immer gegen den Uhrzeigersinn umströmt

In der Südhemisphäre ist es umgedreht. Das hängt mit der Corioliskraft zusammen, die eine ablenkende Wirkung auf Strömungen hat.



Skalendiagramm

Planetarische Wellen



(Nord)Polarstereographische Darstellung des Geopotentials in 500 hPa (schwarze Konturlinien, in gpdam)

Quelle: www.wetter3.de

Siehe auch <https://earth.nullschool.net>

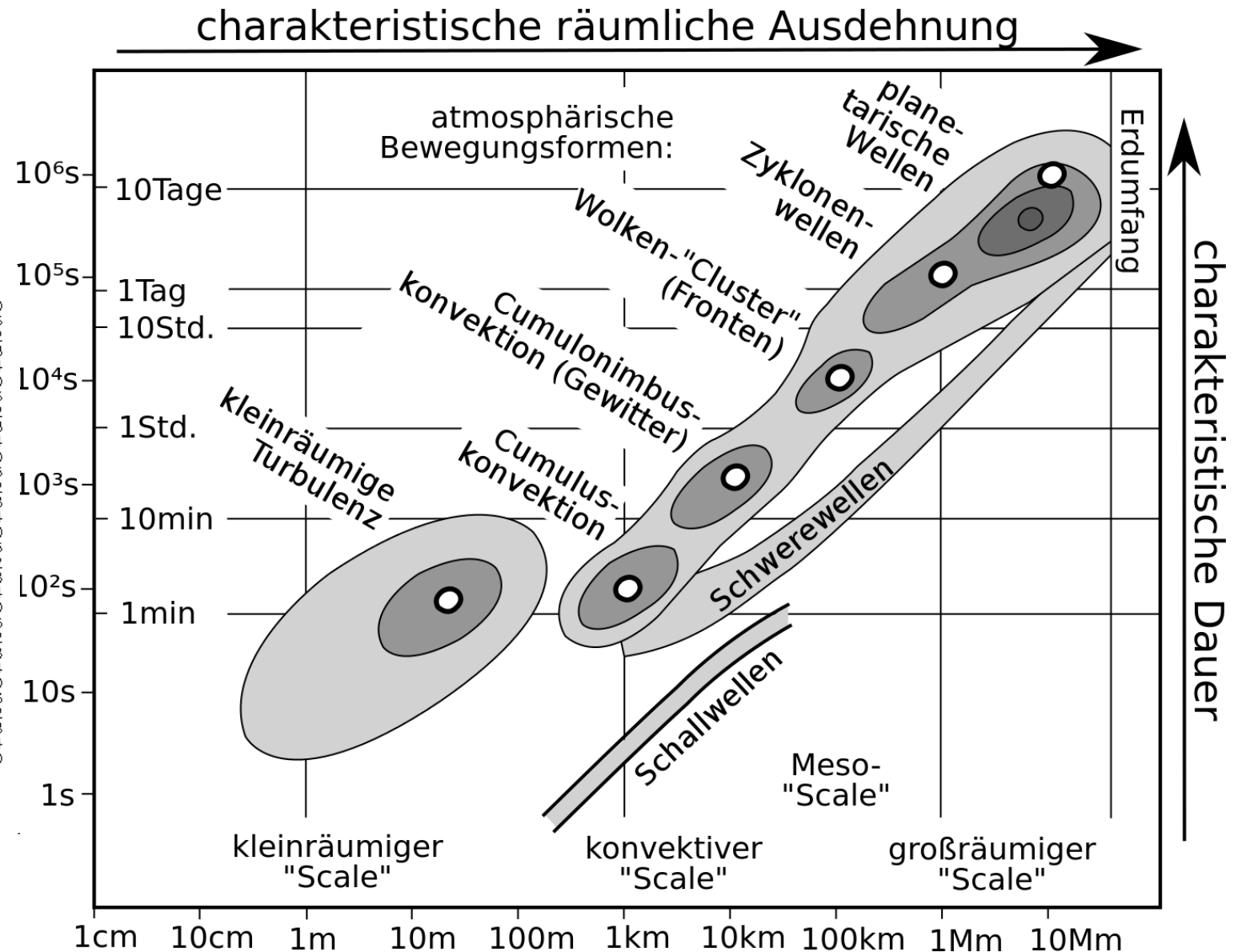


Abb.: „Atmosphärische Bewegungen und ihre typischen Ausdehnungen in Raum und Zeit nach Heinz Fortak: Meteorologie. 2 Auflage. Reimer, 1982, [ISBN 978-3496005063](https://doi.org/10.1007/978-3-496-00506-3)“. Quelle: [Mahque / CC BY-SA 3.0](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/)

Skalendiagramm

Beobachtung: Viele atmosphärische Phänomene „liegen“ im doppeltlogarithm. Skalendiagramm auf einer Geraden.

Aufgaben:

- Schätzen Sie die Steigung der Gerade im doppeltlogarithmischen Plot ab!
- Welche Einheit hat die Steigung, d.h. welcher physikalischen Größe entspricht die reziproke Steigung?

Für viele atmosphärische Phänomene, z.B. die Hochs und Tiefs der mittleren Breiten, wird eine charakteristische Größenordnung der Windgeschwindigkeit von **$U=10 \text{ m/s}$** angenommen.

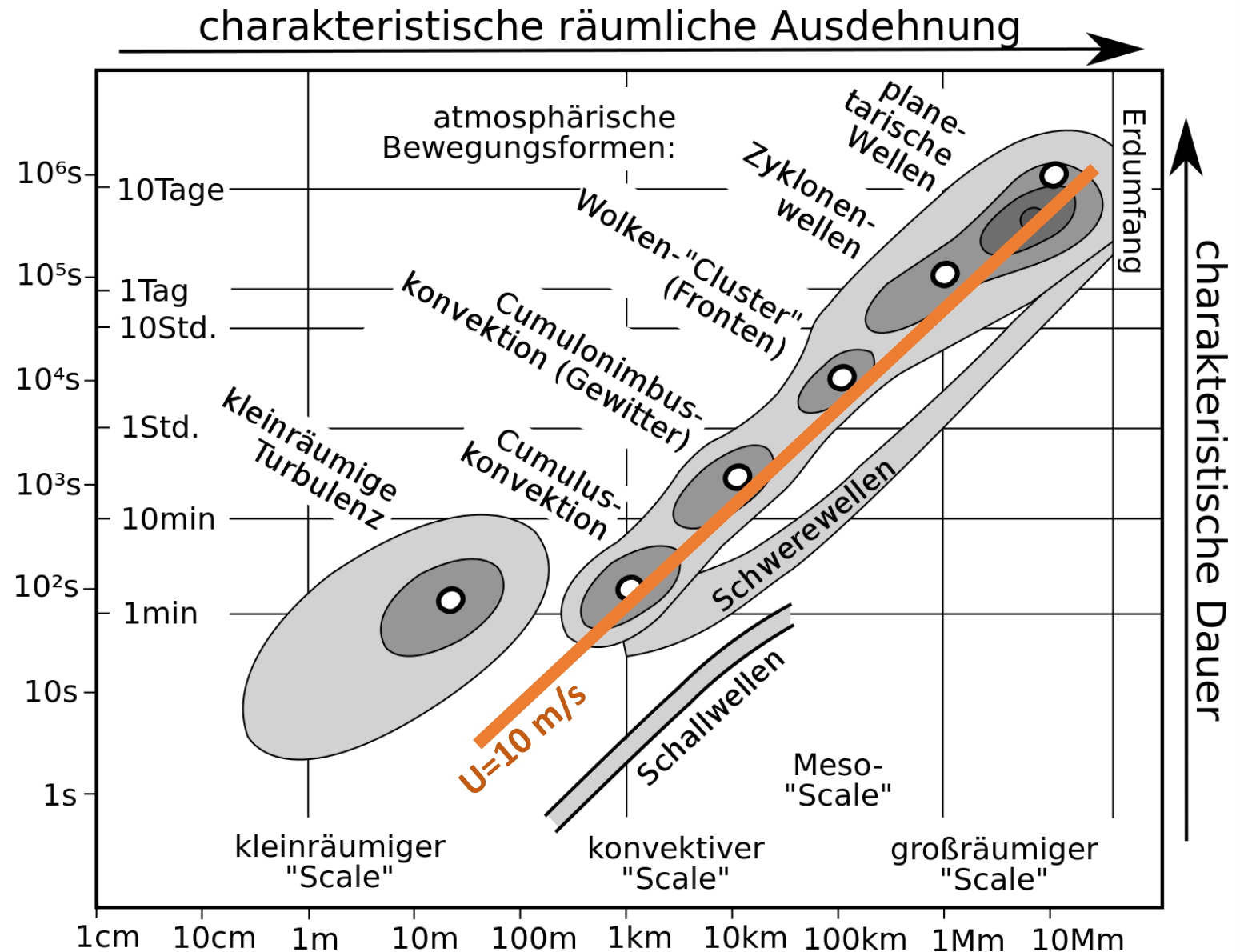


Abb.: „Atmosphärische Bewegungen und ihre typischen Ausdehnungen in Raum und Zeit nach Heinz Fortak: Meteorologie. 2 Auflage. Reimer, 1982, [ISBN 978-3496005063](https://www.reimer-verlag.de/ISBN-978-3496005063)“. Quelle: [Mahque](https://www.mahque.de/) / [CC BY-SA 3.0](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/)

Atmosphärische Prozesse werden mit den meteorologischen Grundgleichungen beschrieben

Die meteorologischen Grundgleichungen

- ... beschreiben die zeitliche Entwicklung und Beziehungen zwischen den meteorologischen Parametern und Feldern wie Druck, Temperatur, Dichte, Wind und Feuchte.
- ... dienen als Grundlage numerischer Modelle zur Wetter- und Klimavorhersage.
- ... werden aus vier Erhaltungssätzen hergeleitet.
- Die Zustandsgleichung idealer Gase schließt das Gleichungssystem.

Wichtige Erhaltungssätze

- **Impulserhaltung** (Newtonsche Axiome: Masse x Beschleunigung = Summe der angreifenden Kräfte)
 - Bewegungsgleichung (Windvektor $\vec{v} = (u, v, w)$, 3 Gleichungen)

Wichtige Erhaltungssätze

- **Impulserhaltung** (Newtonsche Axiome: Masse x Beschleunigung = Summe der angreifenden Kräfte)
 - Bewegungsgleichung (Windvektor $\vec{v} = (u, v, w)$, 3 Gleichungen)
- **Gesamtmassenerhaltung**: Erhöht sich die Luftdichte an einem Ort, so muss Masse aus der Umgebung dorthin geflossen sein.
 - Kontinuitätsgleichung (Dichte ρ)

Wichtige Erhaltungssätze

- **Impulserhaltung** (Newtonsche Axiome: Masse x Beschleunigung = Summe der angreifenden Kräfte)
 - Bewegungsgleichung (Windvektor $\vec{v} = (u, v, w)$, 3 Gleichungen)
- **Gesamtmassenerhaltung**: Erhöht sich die Luftdichte an einem Ort, so muss Masse aus der Umgebung dorthin geflossen sein.
 - Kontinuitätsgleichung (Dichte ρ)
- **Wasserdampfmasseenerhaltung**: Analog zu 2., jedoch eingeschränkt auf Wasserdampf. Hier kann es zusätzlich zu Phasenumwandlungen kommen, d.h. Wasserdampf kann entstehen oder verschwinden.
 - Bilanzgleichung der Feuchte (Feuchte q , Dichte feuchter Luft ρ_w)

Wichtige Erhaltungssätze

- **Impulserhaltung** (Newtonsche Axiome: Masse x Beschleunigung = Summe der angreifenden Kräfte)
 - Bewegungsgleichung (Windvektor $\vec{v} = (u, v, w)$, 3 Gleichungen)
- **Gesamtmassenerhaltung**: Erhöht sich die Luftdichte an einem Ort, so muss Masse aus der Umgebung dorthin geflossen sein.
 - Kontinuitätsgleichung (Dichte ρ)
- **Wasserdampfmasseenerhaltung**: Analog zu 2., jedoch eingeschränkt auf Wasserdampf. Hier kann es zusätzlich zu Phasenumwandlungen kommen, d.h. Wasserdampf kann entstehen oder verschwinden.
 - Bilanzgleichung der Feuchte (Feuchte q , Dichte feuchter Luft ρ_w)
- **Wärmeenergieerhaltung**: Eine Temperaturänderung wird hervorgerufen durch Druckabnahme, Strahlungsumwandlungen und/oder Phasenänderungen des Wasserdampf (Kondensationswärme).
 - Erster Hauptsatz der Thermodynamik (Temperatur T)

Überblick – Grundgleichungen(1)

$$\begin{aligned}
 1.-3. \quad \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \vec{\nabla}) \vec{v} &= - \underbrace{\frac{1}{\rho} \vec{\nabla} p}_{\text{Druck}} - \underbrace{g \vec{k}}_{\text{Schwere}} - \underbrace{2 \vec{\Omega} \times \vec{v}}_{\text{Coriolis}} + \underbrace{\frac{1}{\rho} \vec{\nabla} \cdot \vec{\tau}}_{\text{Reibung}} \quad \text{oder} \\
 1. \quad \frac{\partial u}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \vec{\nabla}) u &= - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + 2 \Omega (v \sin \underbrace{\varphi}_{\substack{\text{geo-} \\ \text{graphische} \\ \text{Breite}}} - w \cos \varphi) + \left(\frac{1}{\rho} \vec{\nabla} \cdot \vec{\tau} \right)_x \\
 2. \quad \frac{\partial v}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \vec{\nabla}) v &= - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} - 2 \Omega u \sin \varphi + \left(\frac{1}{\rho} \vec{\nabla} \cdot \vec{\tau} \right)_y \\
 3. \quad \frac{\partial w}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \vec{\nabla}) w &= - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} - \underbrace{g}_{\substack{\approx 9,81 \text{ m/s}^2 \\ \text{Schwere-} \\ \text{beschleunigung}}} + 2 \Omega u \cos \varphi + \left(\frac{1}{\rho} \vec{\nabla} \cdot \vec{\tau} \right)_z
 \end{aligned}$$

$$4. \quad \frac{\partial \rho}{\partial t} = - \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{v})$$

$$5. \quad \frac{\partial \rho_w}{\partial t} = - \vec{\nabla} \cdot (\rho_w \vec{v}) + \underbrace{\dot{W}}_{\substack{\text{Kondensation,} \\ \text{Verdunsten,} \\ \text{Gefrieren}}}$$

$$6. \quad \frac{\partial T}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \vec{\nabla}) T = \frac{1}{\rho c_p} \frac{dp}{dt} + \frac{1}{c_p} \underbrace{\dot{H}}_{\propto \dot{W} + \text{Strahlung}}$$

$$7. \quad p = \rho \underbrace{R}_{\substack{\text{Gas-} \\ \text{konstante}}} T$$

6 prognostische,
nicht-lineare,
gekoppelte
Differenzial-
gleichungen

1 diagnostische
Gleichung

Überblick – Grundgleichungen(2)

$$1.-3. \quad \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \vec{\nabla}) \vec{v} = -\frac{1}{\rho} \vec{\nabla} p - g \vec{k} - 2\vec{\Omega} \times \vec{v} + \underbrace{\vec{f}_{Fr}}_{\text{Reibung}} \quad \text{oder}$$

$$1. \quad \frac{\partial u}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \vec{\nabla}) u = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + 2\Omega(v \sin \underbrace{\varphi}_{\text{geo-graphische Breite}} - w \cos \varphi) + f_{Fr,x}$$

$$2. \quad \frac{\partial v}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \vec{\nabla}) v = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} - 2\Omega u \sin \varphi + f_{Fr,y}$$

$$3. \quad \frac{\partial w}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \vec{\nabla}) w = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} - \underbrace{g}_{\approx 9,81 \text{ m/s}^2 \text{ Schwere-beschleunigung}} + 2\Omega u \cos \varphi + f_{Fr,z}$$

$$4. \quad \frac{\partial \rho}{\partial t} = -\vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{v})$$

$$5. \quad \frac{\partial \rho_w}{\partial t} = -\vec{\nabla} \cdot (\rho_w \vec{v}) + \underbrace{\dot{W}}_{\text{Kondensation, Verdunsten, Gefrieren}}$$

$$6. \quad \frac{\partial T}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \vec{\nabla}) T = \frac{1}{\rho c_p} \frac{dp}{dt} + \frac{1}{c_p} \underbrace{\dot{H}}_{\propto \dot{W} + \text{Strahlung}}$$

$$7. \quad p = \rho \underbrace{R}_{\text{Gas-konstante}} T$$

1 diagnostische Gleichung

6 prognostische, nicht-lineare, gekoppelte Differenzialgleichungen

$$\frac{dI_\lambda(s, \Omega)}{ds} = -\sigma_{e,\lambda}(s) I(s, \Omega) + \sigma_{a,\lambda}(s) B_\lambda(T(s)) + \frac{\sigma_{s,\lambda}(s)}{4\pi} \oint_{4\pi} P_\lambda(s, \Omega \leftarrow \Omega') I_\lambda(s, \Omega') d\Omega'$$

diagnostische Integro-Differenzialgleichung für Strahlungstransport

diagnostisch

prognostisch

$$\begin{aligned} Q - B - H - LE &\equiv 0 \\ P &= R + E + \frac{dS}{dt} \end{aligned}$$

Strahlungsbilanz = sensibler Wärmefluss + latenter Wärmefluss + Bodenwärmestrom

Niederschlag = Abfluss + Verdunstung + Änderung des Wasserspeichers

Gleichungen für Energieaustausch und Wasseraustausch mit der Erdoberfläche

Folie von Clemens Simmer und Silke Trömel

Lösung der meteorologischen Grundgleichungen

Das meteorologische Grundgleichungssystem ist **ein System aus nicht-linearen, partiellen Differentialgleichungen**, für deren Lösung (und damit die Wetter- oder Klimavorhersage) **numerische Simulationsmodelle** verwendet werden müssen.

Was ist ein nicht-lineares System? Video-Tipp:

<https://www.geo.fu-berlin.de/met/wexicom/FILME/Doppelpendel/index.html>

Zur Lösung des Gleichungssystems müssen der **Anfangszustand der atmosphärischen Zustandsgrößen und die Antriebe** (z.B. Strahlung) bekannt sein.

Zusammenfassung

- Atmosphärische Prozesse laufen auf einer Vielzahl von räumlichen und zeitlichen Skalen ab.
- Aufgabe der Meteorologie ist das Verständnis, die Analyse und die Vorhersage der atmosphärischen Prozesse.
- Die Bewegungen in der Atmosphäre folgen aus physikalischen Erhaltungssätzen und werden mit Hilfe der meteorologischen Grundgleichungen beschrieben. Diese können meist nur mit numerischen Simulationsmodellen gelöst werden können.

Einladung zum Ersti-Café

**Montag, den 10.10.2022
um 14:00 Uhr im Hörsaal,
Auf dem Hügel 20**

mit Kennenlernen
der Fachschaft und
wichtigen Informationen
der Studienberatung

<https://www.ifgeo.uni-bonn.de/studium/lemetgeo/ersti-infos>