

1. UNSER KLIMASYSTEM



Abb. 1: Mit dem Begriff „Klima“ werden Wetterzustände zeitlich – meist über 30 Jahre – zusammengefasst. Eine kühlere Woche im Sommer bedeutet noch nicht, dass der Klimawandel „abgesagt“ ist.

Das Klima ist ein kompliziertes System, das in diesem Kapitel näher dargestellt werden soll. Keinesfalls sollten „Klima“ und „Wetter“ verwechselt werden! Mit dem Begriff „Klima“ werden Wetterzustände zeitlich zusammengefasst (meist über 30 Jahre). Eine kühlere Woche im Sommer – das wäre ein Wetterzustand – bedeutet also nicht, dass der Klimawandel abgesagt ist.

Im Folgenden werden die wichtigsten Begriffe und Grundlagen zu Wetter, Witterung und Klima erläutert. Es geht in diesem Kapitel etwa um Klimafaktoren, Klimaelemente und sogenannte Klimatreiber. Die Unterschiede zwischen Klimavariabilität, Klimaschwankung und Klimawandel werden erklärt. Abschließend findet sich ein kurzer Überblick zum Thema „Klimamodellierung“.

EINLEITUNG

Das Wort „Klima“ stammt aus dem Altgriechischen und bedeutet „neigen“: Aus dem Neigungsverhältnis der Erde zur Sonne, das sich mit der Erdrotation ändert, entstehen jahreszeitlich unterschiedliche Einstrahlungsverhältnisse. Wenn auf der Nordhalbkugel Sommer ist (Nordsommer), erhält sie mehr Sonnenstrahlen als die Südhalbkugel – während des Südsommers ist es umgekehrt.

Zwischen dem Äquator und den beiden Polen herrscht ein ausgeprägter Strahlungsunterschied, durch den sich große Temperaturunterschiede ergeben: Daher ist es am Äquator heiß und an den Polen kalt. Daraus resultieren Druckunterschiede, die – gemeinsam mit der Erdrotation und der Schwerkraft – Winde entstehen lassen.

Das Klima der Erde wird geografisch in verschiedene Klimazonen eingeteilt. Diese Einteilung erfolgt weitgehend nach den unterschiedlichen Strahlungsbedingungen. Diese haben wiederum Auswirkungen auf die Entwicklung von Faktoren wie Lufttemperatur und Niederschlag im Jahresverlauf.

Die wechselvolle Geschichte des Klimas und sein veränderlicher Charakter lassen sich heute anhand von Belegen in der Natur nachvollziehen (mithilfe von Jahresringen von Bäumen, fossilen Pollen oder Eisbohrkernen).

Die Grundlage für fossile Brennstoffe, die wir heute etwa in Form von Kohle und Erdgas nutzen und deren Verbrennung maßgeblich für den Klimawandel verantwortlich ist, wurde schon vor etwa 300 Millionen Jahren gelegt. In diesem Zeitalter – dem Karbon – herrschten völlig andere klimatische und räumliche Bedingungen, die für uns heute nur schwer vorstellbar sind: Amerika und Europa befanden sich zu dieser Zeit in Äquatornähe. Diese Lage bedingte tropisches und schwül-heißes Klima, in dem Riesenfarne und Riesenschachtelhalme gedeihen konnten, die wiederum unsere heutigen fossilen Brennstoffe bildeten.



Abb. 2: „Klima“ stammt aus dem Altgriechischen und bedeutet „neigen“. Aus dem Neigungsverhältnis der Erde zur Sonne entstehen jahreszeitlich betrachtet unterschiedliche Einstrahlungsverhältnisse.

WETTER, WITTERUNG UND KLIMA

Um die komplexen Zusammenhänge betreffend Klima und Klimawandel gut zu verstehen, ist es hilfreich, die gängigsten Begriffe und ihre Definitionen zu kennen. Oftmals sind die Unterschiede zwischen den Begriffen „Wetter“, „Witterung“ oder „Klima“ nicht ganz klar. Wesentlich bei der Unterscheidung ist die Zeitspanne, um die es geht.

Von „**Wetter**“ wird gesprochen,

- wenn man jene Prozesse und Zustände betrachtet, die sich hauptsächlich in den unteren zehn Kilometern der Atmosphäre rasch ändern, und
- die sich auf einen bestimmten Zeitpunkt beziehen.

Zu den Prozessen und Zuständen der Atmosphäre zählen alle meteorologischen Größen (auch „Klimaelemente“ genannt) wie u. a. Sonnenstrahlung,

Luftdruck, Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit, Bewölkung, Niederschlag oder Wind. Auch sogenannte zusammengesetzte Klimaelemente wie Verdunstung, Trockenheit, gefühlte Temperatur (PT) und physiologisch äquivalente Temperatur (PET) gehören dazu.

Die „**Witterung**“ erstreckt sich im Gegensatz zum Wetter über einen größeren Zeitraum, etwa über einen ganzen Tag, eine Woche oder eine Jahreszeit. Wetter und Witterung werden von großräumigen Wetterlagen bestimmt.

Mit dem Begriff „**Klima**“ werden Wetterzustände und Prozesse zeitlich zusammengefasst. Nach der Meteorologischen Weltorganisation (WMO) wird „Klima“ folgendermaßen definiert: „Das Klima ist die Synthese des Wetters über einen Zeitraum, der lange genug ist, um dessen statistische Eigenschaften bestimmen zu können.“ Üblicherweise wird dabei von einem Zeitraum von 30 Jahren ausgegangen.

Grundlegende statistische Eigenschaften, die untersucht werden, sind Mittelwert, Streuung, Extrema und die Häufigkeitsverteilung von meteorologischen Größen. Vor allem die Extrema – also extreme Wetterereignisse – haben hinsichtlich des menschenverursachten (anthropogenen) Klimawandels die größten Auswirkungen auf die Gesellschaft: Ob Hitzewellen in Zukunft häufiger auftreten werden, ist von essenzieller Bedeutung für jeden Einzelnen und für die gesamte betroffene Volkswirtschaft.

GEFÜHLTE TEMPERATUR UND PET

Die Lufttemperatur wird in der Meteorologie nach vorgegebenen internationalen Richtlinien (strahlungsgeschützt, ventiliert) gemessen. Der Mensch ist jedoch einer Kombination von meteorologischen Größen ausgesetzt:

- Lufttemperatur,
- Strahlungsbedingungen,
- Windgeschwindigkeit und
- Luftfeuchtigkeit.

All diese Faktoren haben Einfluss auf die thermische Wahrnehmung. So bringt uns eisig kalter Wind bekanntlich zum Frösteln, während hohe Luftfeuchte so-

wie direkte Sonnenstrahlung uns schwitzen lassen. Körperliche Aktivität ist – ebenso wie Gewicht, Körpergröße, Geschlecht und Alter – wesentlich für das thermische Empfinden.

PET (physiologisch äquivalente Temperatur; *physiological equivalent temperature*) und PT (gefühlte Temperatur; *perceived temperature*) beziehen sowohl die meteorologischen als auch die thermophysiologischen Einflussfaktoren mit ein, wobei als Grundlage der Berechnungen ein „Modellmensch“ mit bestimmten definierten Eigenschaften dient. Mit PET und PT lässt sich so die thermische Belastung für den Menschen sehr anschaulich darstellen. Allerdings werden damit nur Richtwerte geliefert, individuelle Faktoren können nicht berücksichtigt werden.

Auf der Website der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik kann man sich über die aktuelle gefühlte Temperatur informieren: www.zamg.ac.at



DAS KLIMASYSTEM

Die Atmosphäre ist die Lufthülle unserer Erde, in der das Wettergeschehen stattfindet. Sie ist aber nicht isoliert zu betrachten, sondern befindet sich in Wechselwirkung mit den anderen Komponenten des Erdsystems: mit Wasser und Eis, mit Leben und der festen Erde. Daher wird der Begriff „Klimasystem“ verwendet. Das Klimasystem umfasst die

- Atmosphäre,
- Hydrosphäre,
- Kryosphäre,
- Biosphäre und
- Geosphäre.

In dem System laufen komplexe Prozesse ab, die miteinander verwoben sind (siehe Abb. 3).

Wind und große Wasseroberflächen sind direkt verbunden: Wind regt die Oberflächenströmungen der Ozeane an – ein bekanntes Beispiel ist der Golfstrom, der für das bemerkenswert milde Klima an den Küsten Nordeuropas verantwortlich ist. Die Wetterphänomene „El Niño“ und „La Niña“ haben ihren Ursprung im tropischen Pazifik, wirken aber auf das globale Klima.

Überhaupt muss das Klimasystem gesamtheitlich betrachtet werden – insbesondere, wenn man sich auf längere Zeitskalen konzentriert, die Klimaschwankungen und den Klimawandel abbilden.

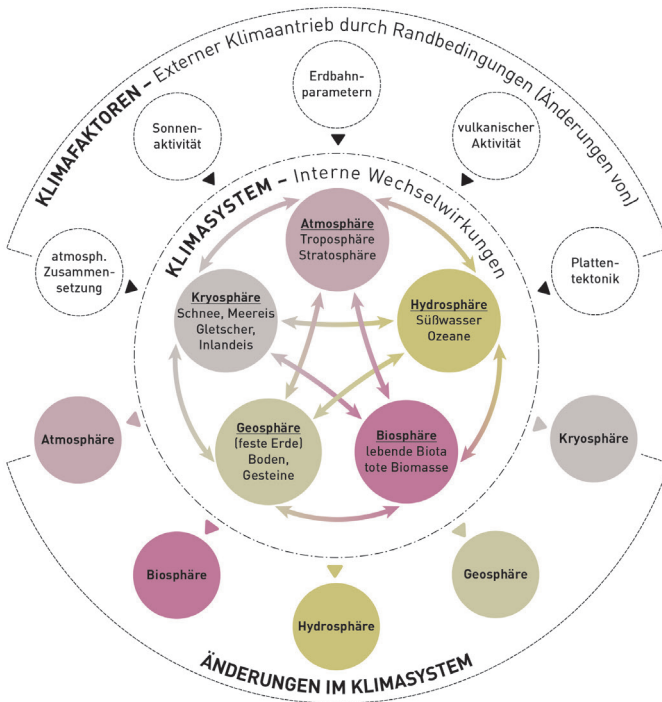


Abb. 3: Externe Klimatreiber, Klimasystem, Klimaänderung (Quelle: NOAA, leicht geändert).

Sogenannte externe **Klimatreiber** wirken von „außen“ auf das Klimasystem – sie beeinflussen das Klima, werden selbst aber nicht davon beeinflusst. Die Sonne und die Drift der Kontinente zählen etwa zu diesen externen Klimatreibern, aber auch Vulkanausbrüche sowie menschengemachte Treibhausgas- und Partikelemissionen (Aerosole) haben große Auswirkungen auf das Klima.

Betrachtet man das Klima der vergangenen Jahrzehnte und Jahrhunderte, wird der Zusammenhang zwischen Klimaveränderungen und äußeren Klimatreibern deutlich: Auf den Ausbruch des indonesischen Vulkans Tambora im Jahr 1815 folgte 1816 das „Jahr ohne Sommer“ mit Missernten in weiten Teilen Europas. Während des „Maunder-Minimums“ der Sonnenaktivität 1645 bis 1715 sank die globale Mitteltemperatur um $0,5^{\circ}\text{C}$, der Winter 1708/1709 war der kälteste in Europa der letzten 500 Jahre und seit 1900 ist die globale Mitteltemperatur um etwa $0,8^{\circ}\text{C}$ gestiegen.

Unter **Klimafaktoren** versteht man die räumlichen Randbedingungen, die Einfluss auf das Klima haben. Man unterscheidet dabei zwischen kleinräumiger, mittlerer und großräumiger Skala. So bewirkt etwa die Land-See-Verteilung oder die Entfernung zu großen Wasserflächen entweder ein eher kontinentales oder eher ozeanisch geprägtes Klima (großräumige Skala). Die Ausrichtung von Gebirgen oder die Höhenlage einer Region wirken sich auf das Klima (mittlere Skala) ebenso aus wie Hangexposition, Hangneigung oder Eigenschaften des Untergrundes (kleinräumige Skala). Daran anknüpfend werden drei Klimagrößen unterschieden:

- Das **Makroklima** beschreibt das Klima einer größeren Region in einem Umkreis von ca. tausend bis zehntausend Kilometer (z. B. Kontinent),
- das **Regional- oder Mesoklima** bezieht sich auf ein Areal von einem bis etwa tausend Kilometer Umkreis, und
- das **Mikroklima** auf ein Areal von einem Kilometer und weniger.

Mit **Klimaelementen** kann das Klima in jeder räumlichen Größenskala dargestellt werden: etwa vom Mikroklima auf einer Waldlichtung bis hin zum globalen Klima. Klimaelemente sind etwa Sonnenscheindauer, Luftdruck, Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit, Niederschlag und Wind. Darüber hinaus gibt es

noch speziellere Klimaelemente, wie Verdunstung, Boden-/Wassertemperatur und sogenannte Klima-Indizes. Diese werden aus einer Kombination von Klimaelementen berechnet.

Aus der **Sonneneinstrahlung** beziehen Erde und Atmosphäre fast ihre gesamte Energie. Am Außenrand der Erdatmosphäre macht die Bestrahlungsstärke $1,367 \text{ kW/m}^2$ aus. Diesen Wert bezeichnet man als sog. Solarkonstante.

Der **Luftdruck** in einer bestimmten Höhe entspricht der Gewichtskraft, die durch die darüber befindliche Luftsäule auf die Einheitsfläche (m^2) einwirkt. Daher sinkt der Luftdruck mit der Höhe. So beträgt der Luftdruck auf dem Gipfel des Mount Everest nur noch etwa ein Drittel des Wertes auf Meeresebene, am Großglockner sind es zwei Drittel. Entsprechend fällt auch der Sauerstoff-Partialdruck (Sauerstoff-Teildruck), d.h. entsprechend der Abnahme des Luftdrucks nimmt auch der Sauerstoffgehalt der Luft ab. Die physikalische Einheit für den Luftdruck ist Hekto-Pascal (hPa), das entspricht dem Millibar (mb).

Wind strömt von höherem zu tieferem Druck – dadurch werden unterschiedliche Luftdruckstärken ausgeglichen. Tiefdruckgebiete wären daher rasch aufgefüllt, die Erddrehung wirkt dem jedoch entgegen und sorgt für Ablenkungen des Windes. Der Wind ist umso stärker, je größer die Luftdruckunterschiede sind.

Die **Lufttemperatur** gehört mit Niederschlag, Luftfeuchtigkeit und Luftdruck zu den wichtigsten Klimaelementen und ist ein Maß für den Wärmezustand der Atmosphäre. Sie wird unter strahlungsgeschützten Bedingungen gemessen, häufig wird der Messfühler auch belüftet, um Strahlungseinflüsse auf den Sensor zu vermeiden. Die physikalische Einheit für die Lufttemperatur ist Kelvin, in der Klimatologie wird jedoch meist die Celsius-Skala angewendet. Die Luft erwärmt sich von unten her und kühlt beim Aufsteigen ab: In einem Luftpaket ist Energie in Form von Wärme enthalten, diese Energie wird zum Aufsteigen verwendet – dadurch kühlt sich die Luft um etwa 1°C pro 100 m ab. Wenn der im Luftpaket enthaltene Wasserdampf kondensiert, wird Energie freigesetzt und die Temperaturabnahme beträgt nur noch etwa $0,6^\circ\text{C}$ pro 100 m. Es gibt jedoch eine Umkehr von dieser Regel, man spricht dann von „Inversion“. In windschwachen, wenig bewölkten Nächten kann es häufig vorkommen, dass

die Luft in höheren Schichten wärmer als im Tal ist. Bodennah sammelt sich kalte, „schwere“ Luft an, der vertikale Austausch mit der relativ warmen Luft ist unterbunden. Es entsteht eine stabile Schichtung der Luft, der Luftaustausch wird verhindert und Luftschadstoffe aus Verkehr, Industrie oder Hausbrand reichern sich in der Kaltluft an.

Wasser existiert auf der Erde bekanntlich in gasförmigem, flüssigem und festem Aggregatzustand. Beim Übergang in einen nächsthöherem Zustand (z. B. vom Wasser zum Wasserdampf) wird viel Energie verbraucht. Diese wird wieder frei, wenn der Prozess in umgekehrter Reihenfolge stattfindet, beispielsweise wenn Wasserdampf kondensiert. Auch ein direkter Übergang von Wasserdampf zu Eis (z. B. Reif) oder umgekehrt (z. B. Schneeverdunstung) kann vorkommen.

Unter **Luftfeuchtigkeit** versteht man Wasser, das sich in gasförmigem Zustand in der Atmosphäre befindet. Wasserdampf hat folgende bedeutende Eigenschaft: Er ist durchsichtig und durchlässig für die einfallende Sonnenstrahlung, die langwellige Ausstrahlung der Erdoberfläche wird jedoch absorbiert. Er hält die Wärme also zurück, was eine Verstärkung des Treibhauseffektes bewirkt. Tropische Meere sind die wichtigsten Wasserdampfquellen. Der Wasserdampfvorrat der Atmosphäre muss alle zehn bis elf Tage umgewälzt werden, um den mittleren globalen Jahresniederschlag von etwa 800 mm zu ermöglichen.

Es gibt verschiedene Maße für Luftfeuchtigkeit, als absolutes Maß wird in der Meteorologie oft der Dampfdruck herangezogen. Ein Kubikmeter Luft kann nur eine bestimmte maximale Wasserdampfmenge enthalten. Die Kapazität steigt mit einer Erhöhung der Temperatur. Wird der Grenzwert überschritten, führt dies zur Kondensation, bei der Wassertröpfchen gebildet werden. Der Sättigungsdampfdruck steigt exponentiell mit der Temperatur. Mit der relativen Feuchtigkeit wird der Wasserdampfgehalt der Luft im Verhältnis zum maximal möglichen Sättigungswert bei der bestehenden Temperatur angegeben (in Prozent).

Die Entstehung von Niederschlag ist komplex: Auslöser sind Hebungsprozesse (Vertikalbewegung von Luftmassen), die in Tiefdrucksystemen an der Grenze von unterschiedlich temperierten und dichten Luftmassen (Kaltfronten und Warmfronten) stattfinden. Auch bei einer starken Überwärmung der boden-

nahen Luftpakete durch ausgeprägte Sonneneinstrahlung wird Niederschlag gebildet: Die Luft wird wärmer und steigt auf, das Luftpaket kühlt ab, in einer bestimmten Höhe wird das Kondensationsniveau erreicht. Das Luftpaket ist voll mit Wasserdampf, dieser kondensiert und es bilden sich Wolken. Wachsen die Tröpfchen darin weiter an, hat dies Niederschlag zur Folge. Gebirgsränder verstärken die Hebungsprozesse. Daher findet man in Österreich Niederschlagsmaxima im Bereich des Bregenzerwalds, der Nördlichen Kalkalpen, der Karnischen Alpen und der Karawanken. Hier beträgt die mittlere Jahressumme des Niederschlags 2.000 mm und mehr.

KLIMAVARIABILITÄT, KLIMASCHWANKUNG UND KLIMAWANDEL

Unter „**Klimavariabilität**“ versteht man die kleinskaligen Schwingungen von Jahr zu Jahr, auch „Klimarauschen“ genannt. „**Klimaschwankungen**“ erstrecken sich zumindest über zehn Jahre und können sowohl von externen Klimatreibern verursacht werden als auch intern entstehen. Wenn diese Änderungen in eine Richtung gehen, ist die Rede von Klimaänderung oder Klimawandel. Die Grenze zwischen Klimaschwankung und **Klimawandel** verläuft fließend. Der durch Menschen verursachte (anthropogene) Klimawandel wird jedenfalls von „außen“ angekurbelt – durch die Emission von Treibhausgasen.

NATÜRLICHER UND VOM MENSCHEN VERURSACHTER TREIBHAUSEFFEKT

Der Begriff „Treibhauseffekt“ ist heute fast jedem bekannt. Aber was genau versteht man darunter? Verantwortlich für den Treibhauseffekt sind sogenannte

Treibhausgase wie Kohlendioxid (CO_2), Wasserdampf (H_2O) und Ozon (O_3). Sie lassen die Sonnenstrahlung ungehindert auf der Erdoberfläche auftreffen, nehmen aber die Infrarotstrahlung der Erdoberfläche teilweise auf und senden einen Teil davon wieder zur Erdoberfläche zurück. Das hat zur Folge, dass sich die bodennahen Luftschichten erwärmen. Den Zusammenhang zwischen Treibhausgaskonzentration und Temperatur entdeckte der schwedische Chemiker und Physiker Svante Arrhenius übrigens schon Ende des 19. Jahrhunderts.

Der natürliche Treibhauseffekt und Treibhausgase sind notwendig, da sie verträgliche Lebensbedingungen schaffen. Ohne Atmosphäre, oder wenn diese nur aus Stickstoff und Sauerstoff zusammengesetzt wäre, läge die durchschnittliche Oberflächentemperatur der Erde bei -18°C . Durch den natürlichen Treibhauseffekt, an dem der Wasserdampf einen Anteil von etwa 60 Prozent hat, wird die Temperatur in den bodennahen Luftschichten um 33°C erhöht. Daher beträgt die mittlere Temperatur derzeit etwa 15°C . Der Treibhauseffekt an sich ist also nicht negativ – im Gegenteil: Wir sind auf ihn angewiesen.

Gefährlich wird es aber, wenn zum natürlichen Treibhauseffekt der menschengemachte hinzukommt. Durch menschliche Aktivitäten vermehren wir nicht nur die bereits vorhandenen Gase in der Atmosphäre, wir emittieren zusätzliche Substanzen – etwa Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW) oder Stickoxide (NO_x). Befinden sich zu viele Treibhausgase in der Atmosphäre, hat das Auswirkungen auf das Klima: Die untere Atmosphäre und die Erdoberfläche erwärmen sich. Man spricht dann vom anthropogenen (vom Menschen verursachten) Treibhauseffekt. Der CO_2 -Anteil macht dabei etwa 50 Prozent aus.

DIE ARGUMENTE DER KLIMASKEPTIKER

Manche Klimaskeptiker argumentieren, dass gar keine signifikante Klimaerwärmung stattfindet. Der Erwärmungstrend in den Temperaturreihen sei einfach ein Produkt der Verstädterung (städtische Wärmeinseln). – Dem muss man entgegenhalten, dass die Messdaten diesbezüglich korrigiert werden. Auch die über den Ozeanen und auf Bergobservatorien gemessenen Temperaturen, der Gletscherschwund etc. sprechen für eine Erwärmung. Weiters sollen Satellitenmessungen angeblich keine oder nur eine schwache Erwärmung erkennen