

Was Messdaten derzeit aussagen (Teil 1)



Die Hauptenergiequelle des Klimasystems auf unserem Heimatplaneten ist die Sonneneinstrahlung. In der am wenigsten stabilen Hauptkomponente unseres Klimasystems, in der Atmosphäre wirkt sich dieser Energieeintrag auf unterschiedliche Weise oft sehr stark aus. Eine der stärksten Auswirkungen drückt sich in dem für uns auch an der Erdoberfläche beobachtbaren Wettergeschehen aus.

Viele Menschen stellen für sich selbst immer wieder fest, dass sich das Wetter nicht mehr so verhält, wie sie es aufgrund ihrer Erfahrungen für die entsprechende Jahreszeit erwarten. Irgendwie scheinen sich die grundlegenden Erscheinungsformen der bisher bekannten Jahreszeiten zu verändern. Inzwischen stellen dies die Menschen überall auf dem Globus fest. Diese Feststellungen beziehen sich nicht nur auf die jeweiligen Orte, sondern auch auf die Ausprägungen der dort ablaufenden Jahreszeiten. Global betrachtet sind es daher allgemeine Feststellungen über das Empfinden des jeweils lokalen und individuell erlebten Wettergeschehens. Auch die Wissenschaften haben diese Verände-

FIWISO / Klimafolgen / Erkannte Veränd. / Was Messdaten aussagen (Teil 1)

rungen registriert und beobachten die von vielen empfundenen Verschiebungen mit verschiedenartigen Messreihen. Sie betrachten dabei nicht nur die jeweils aktuell erfassten Daten, sondern beziehen in die Betrachtungen auch die Daten früherer Messungen und Messreihen ein. Auf diese Weise und durch das Verknüpfen der unterschiedlichen Messungen durch Fragen zu den Abhängigkeiten verschiedener Werte untereinander, werden aus reinen Wetter- oder momentanen Zustandsdaten auch Aussagen zur längerfristigen Beschaffenheit des untersuchten Zustands möglich.

Auf diese Weise werden aus Wetterdaten auch Aussagen zum Klima und zu dessen Veränderungen möglich. Leider hat sich in den gesellschaftlichen Diskussionen über diese Aussagen auch gezeigt, dass es immer wieder Gegenansichten gibt, die eine bestimmte Aussage zu den global gemessenen Klimawerten nicht nur anzweifeln – nein sie wird auch grundsätzlich als falsch abgelehnt und entsprechend bekämpft. Daher stellen wir in diesem Aufsatz die uns zugänglichen und über Messwerte sowie wissenschaftliche Untersuchungen belegbaren Beobachtungen zum Thema Wetter- und Klimaveränderungen zusammen, um für jeden Leser eine entsprechende Grundlage für die individuelle Meinungsbildung anzubieten. Damit kann jeder aufmerksame Leser sein Denken über die verschiedenen Aussagen zum „menschengemachten Klimawandel“ ergänzen.

Inhalt: Was Messdaten derzeit aussagen - Teil 1

Von der Wetterbeobachtung zum Erfassen des Klimasystems	Seite 3
Wichtige Zusammenarbeit beim Erforschen des Klimawandels	Seite 7
Ergebnisse der bisherigen Forschungen zum Thema Klimawandel	Seite 8
Veränderungen in der Atmosphäre	Seite 8
Die Luft an der Erdoberfläche ist deutlich wärmer geworden	Seite 8
Temperaturrekorde häufen sich vor allem in den letzten Jahren	Seite 8
Die Anzahl der Frosttage in Deutschland nimmt ab	Seite 9
Die Anzahl der heißen Tage in Deutschland nimmt zu	Seite 9
Der Gehalt an Kohlendioxid steigt seit etwa 1850 ständig an	Seite 9
Auch für andere Treibhausgase steigen die Gehalte in der Atmosphäre an	Seite 11
Veränderungen in der Hydrosphäre	Seite 11
Auch das Wasser in den Weltmeeren ist wärmer geworden	Seite 12
Die Ozeane nehmen derzeit einen Teil der Erderwärmung auf	Seite 12
Der Meeresspiegel steigt weltweit an	Seite 13
Die Ozeane nehmen immer schneller einen saureren Charakter an	Seite 14
Veränderungen in der Kryosphäre	Seite 16
Der grönländische Eisschild verliert immer mehr Eis	Seite 16

FIWISO / Klimafolgen / Erkannte Veränd. / Was Messdaten aussagen (Teil 1)

Das arktische Meereis in der nördlichen Polregion wird weniger Gletscher und Schneebedeckungen schwinden	Seite 16
Veränderungen in der Biosphäre	Seite 18
Die Vegetationsperioden verschieben sich	Seite 18
Verbreitungsgebiete und Populationen von Pflanzen verändern sich	Seite 19
Die Artenvielfalt schwindet und neue Gefahren entstehen	Seite 19
Die Frühjahrsaktivitäten in der Tierwelt finden früher statt	Seite 20
Wechselbeziehungen werden gestört	Seite 20
Veränderungen in der Pedosphäre	Seite 20
Es gibt längere Dürreperioden und die Gefahr von Waldbränden	Seite 20
In Dürreperioden trocknen auch tieferliegende Bodenbereiche aus	Seite 21

Was Messdaten derzeit aussagen – Teil 2 (mit Literaturhinweisen)

bitte auf folgender Seite unterhalb von „Weltweit erkannte Veränderungen“ öffnen:

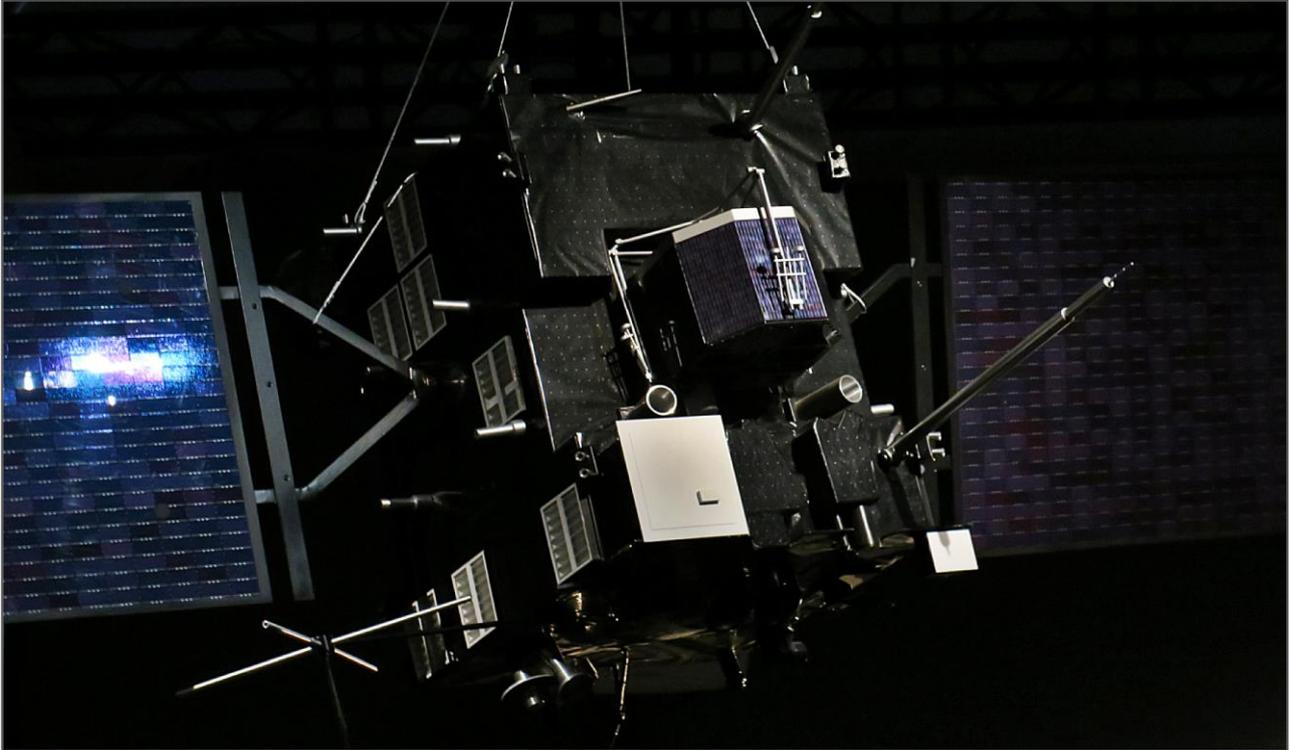
<https://www.fiwiso-allianz.de/240/klimafolgen>

Von der Wetterbeobachtung zum Erfassen des Klimasystems

Das Beobachten des Wetters ist wahrscheinlich schon so alt wie die Menschheit. Das Aufzeichnen und das Festhalten von Daten über das Wetter ist dagegen wesentlich jünger. Es begann sicher auch schon vor mehreren tausend Jahren und beschäftigte sich zunächst mit dem Beschreiben großer Ereignisse, die zeitlich eher mit gesellschaftlichen Geschehnissen verknüpft wurden. Erste Versuche bekannte Beobachtungen des Wetters und anderer Beobachtungen aus der natürlichen Umwelt so zu beschreiben, dass sie mit gewissen Abhängigkeiten voneinander gedeutet und daraus einige Regelmäßigkeiten abgeleitet wurden, führten in der Folge zu verschiedenen Richtlinien, die heute als Bauernregeln bezeichnet werden.

Die systematische und professionelle Aufzeichnung von Wetterdaten, die heute auch zur Analyse von Klimaveränderungen mitverwendet werden können, begann erst 1781 im Observatorium Hohenpeißenberg in Bayern. Die moderne Wetterbeobachtung mit Hilfe unbemannter Wetterballons begann dann erst 1862. Im 20. Jahrhundert wurde die Wetterbeobachtung durch Schiffe und Flugzeuge ergänzt. Nach 1950 wurden die Beobachtungen dann zusätzlich durch neue Methoden wie das Wetterradar erweitert. Von etwa 1960 an sind auch Beobachtungen durch Satelliten hinzugekommen. Geostationär positionierte Wettersatelliten wurden von 1966 an zur Wetterbeobachtung eingesetzt.

Im Laufe dieser Entwicklung wurden auch immer wieder neue Sensoren, neu entwickelte Messverfahren und neue Möglichkeiten der Datenauswertung und der Datenspeicherung verwendet.



Das Beobachten der Atmosphäre, das Sammeln von Wetterdaten und von Daten zur Erdbeobachtung wird heute mit Hilfe von Satelliten durchgeführt. Aufgrund verschiedener Bahnen und Positionierungen der Satelliten sind dabei fast alle Daten global erfassbar. Satelliten zur Erdbeobachtung umkreisen die Erde auf polaren Umlaufbahnen etwa 800 km über der Oberfläche. Wettersatelliten werden in geostationären Umlaufbahnen so positioniert, dass sie sich mit der Erddrehung bewegen und in einem Abstand von etwa 36.000 km über einem Punkt des Äquators „stehen“.

Diese mess- und datentechnischen Weiterentwicklungen ermöglichten es, die ständig anwachsenden Datenmengen zu erfassen, zu speichern und diese auch immer schneller auswerten zu können. Mit der Erkenntnis, dass in den über lange Zeiträume hinweg regelmäßig beobachteten meteorologischen Wetterdaten auch Informationen über das Klima und seine Veränderungen enthalten sind, wurden dann auch Aussagen zu klimarelevanten Fragen ermöglicht. Inzwischen liegen jede Menge an Daten vor, die auch über Langzeit-Messreihen zur Beobachtung und zur Auswertung von Klimaveränderungen herangezogen werden. In der weiteren Abfolge wurden die bestehenden Beobachtungsstationen zu Messnetzen verknüpft. Über diese können jetzt auch thematisch orientierte Langzeit-Messreihen global erfasst und über die bestehenden Rechnernetze für meteorologische oder klimatologische Berechnungen ausgewertet und mit theoretischen Klimamodellen verglichen werden.

Damit wird deutlich, dass es eine dem lokalen und kurzfristig wirkenden Wettergeschehen übergeordnete und längerfristige Zustandsbeschreibung der Atmosphäre gibt. Der bei dieser Betrachtung so wichtige Zeitfaktor macht es auch für viele Menschen schwie-

rig, solche Zustandsbetrachtungen zu verstehen und anzuerkennen. Leider lassen es die gesellschaftlichen Strukturen, in denen wir uns bewegen, grundsätzlich nur noch zu, ein schnelles oder beschleunigt erzielbares Ergebnis als gut oder als im Vergleich besser anzustreben. Jedes System zur Beobachtung von Klimadaten beruht jedoch auf Langzeitmessreihen für eine Vielzahl von Parametern, die mit den unterschiedlichsten Mess- und Beobachtungsmethoden ermittelt werden. Diese messbaren Eigenschaften unseres Klimasystems prägen als Einzelgrößen und durch ihr Zusammenwirken das Klima und die verschiedenen Klimazonen unserer Heimat Erde.

Hauptenergiequelle ist die Sonneneinstrahlung, die sich in den verschiedenen Hauptkomponenten dieses Klimasystems unterschiedlich auswirkt. Als Hauptkomponenten werden die gasförmige Atmosphäre, die aus flüssigem Wasser bestehende Hydrosphäre, die aus festem Wasser in der Form von Schnee und Eis bestehenden Bereiche der Kryosphäre, die mit lebenden Organismen erfüllte Biosphäre, der aus Gesteinen bestehende Planetenkörper der Lithosphäre und der aus den lockeren Böden bestehende Grenzbereich zwischen Atmosphäre und Lithosphäre, die Pedosphäre betrachtet. Dieses Klimasystem wird von externen Energien angetrieben, zu denen neben der Hauptenergiequelle Solarstrahlung auch der Vulkanismus aus dem inneren des Planetenkörpers und inzwischen auch menschliche Aktivitäten auf der Oberfläche des Planeten gehören.

Um die Prozesse, die inzwischen eine erkennbare Wirkung auf das Klimasystem unseres Planeten ausüben, als Klimafaktoren erkennen zu können, werden inzwischen als wichtigste Messgrößen auch für langfristige Beobachtungen folgende Daten erfasst und ausgewertet: Albedo, Bewölkung, Globalstrahlung, Luftdichte, Luftdruck, Luftfeuchtigkeit, Lufttemperatur, Niederschlagsart, Niederschlagsmenge, Sichtweite, Sonnenscheindauer, Windgeschwindigkeit, Windrichtung sowie die Konzentrationen einzelner Komponenten in der chemischen Zusammensetzung der Atmosphäre (beispielsweise die Konzentrationen einzelner Klimagase). Mit Hilfe dieser Messergebnisse können über verschiedenartige Darstellungen der Daten einerseits die zeitlichen Entwicklungen einzelner Parameter an bestimmten Orten, oder andererseits die räumlichen Veränderungen in einzelnen Bereichen oder für den gesamten Globus am Beispiel einzelner Parameter sichtbar gemacht werden.

Auf diese Weise ist es auch möglich, Bereiche mit gleichen klimatischen Bedingungen zu erkennen und diese geographischen Abschnitte zu Klimazonen zusammenzufassen. Damit ergibt sich – global betrachtet – ein Bild zur Verteilung der Klimazonen zum jeweiligen Zeitpunkt der Betrachtung. Werden dann die gleichen Betrachtungen mit den gleichen Messpunkten jeweils zu anderen Zeitpunkten wiederholt und miteinander verglichen, können regionale Verschiebungen dieser globalen Klimazonen beobachtet werden. Weitere Untersuchungen dazu, welche Parameter sich an den einzelnen Messpunkten bei den miteinander verglichenen Zeitpunkten auf welche Weise verändert haben, können dann Hinweise auf die Art der Veränderungen in den Klimazonen anzeigen.

Für solche zeitlichen Beobachtungsreihen empfiehlt die Weltorganisation für Meteorologie – WMO immer eine Klimanormalperiode mit einer Dauer von 30 Jahren zu beobachten und auszuwerten. Als Referenzperiode wird dabei der Zeitraum von 1961 bis 1990 definiert. Der Folgezeitraum umfasst dann die Jahre 1991 bis 2020. Bedingt durch die Tatsache, dass viele Zusammenhänge erst in den letzten Jahren erkannt und viele Untersuchungen erst in den letzten 20 Jahren begonnen wurden, haben sich vor allem im Alpenraum auch andere Beobachtungsperioden etabliert. So hat beispielsweise die österreichische Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik – ZAMG für die in den Alpen wichtigen Gletscherinventare oft die Periode 1971 bis 2000 herangezogen. Das Schweizer Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie – MeteoSchweiz bezieht seine Forschungen und Untersuchungen häufig auf eine Referenzperiode von 1981 – 2010. Die weltweit bekannten Temperaturanomalien vom Jahr 1880 an werden im international anerkannten Index des Goddard Institute for Space Studies – GISS auf der Grundlage des Referenzzeitraums von 1951 bis 1980 dargestellt.

Es fällt auf, dass in allen solchen auch international verwendeten Vergleichen die Referenzperioden zum Ermitteln der zum Vergleich verwendeten Durchschnittswerte meist mit einer Referenzlänge von 30 Jahren gewählt wurden. Nur dann, wenn es keine lückenlose Dokumentation der benötigten Messdaten gibt, wird entweder auf größere Zeiträume oder auf andere Daten zurückgegriffen, aus denen ebenfalls auf die zu untersuchenden Größen zurückgeschlossen werden kann. Als Beispiel können hier die Angaben aus geologischen und paläontologischen Untersuchungen über die Klima- und Temperaturbedingungen in vergangenen Erdzeitaltern dienen. Dabei werden über die Gesteine, über möglicherweise enthaltene Fossilien und über die Daten zu den Untersuchungen von klimarelevanten Isotopeninhalten die jeweiligen klimatischen Verhältnisse - den physikalischen, chemischen und biologischen Basisdaten entsprechend – rekonstruiert. In diesen erdgeschichtlichen Zeitabschnitten gab es eben noch keine Aufzeichnung meteorologischer Daten.

Bei all diesen bisherigen verschiedenartigen Denkansätzen und Untersuchungen wird jedoch ein grundlegender Zusammenhang von allen Seiten festgestellt und immer wieder benannt. Im Klimasystem unseres Heimatplaneten greifen viele verschiedenartige Prozesse ineinander, sodass es uns wie ein äußerst komplexes System unterschiedlichster und auf vielfältige Weise miteinander verzahnter Kreisläufe erscheint. Schon ein Verändern einer Größe kann daher durch die oft weitreichenden Verknüpfungen und Abhängigkeiten zu starken Veränderungen im Klimasystem führen. Dabei kann es auch dazu kommen, dass mit dem Verändern einer bestimmten Größe die Zustandsbedingungen anderer Parameter auf eine Weise beeinflusst werden, die in der Folge zu nicht mehr umkehrbaren Zuständen des Klimasystems führen. Ein auf diese Weise begonnener Wandel im Klimasystem wird, aufgrund der nachfolgend durch natürliche Abhängigkeiten erzwungenen Zustandsänderungen, weiter angetrieben. Solche Punkte, die den Beginn eines systembedingten gravierenden Klimawandels darstellen können, werden als Kipp-Punkte des Klimasystems bezeichnet.

Wichtige Zusammenarbeit beim Erforschen des Klimawandels

Die verschiedenartigen Messungen, Beobachtungen und Forschungen, die in den letzten Jahrzehnten durchgeführt wurden und deren Ergebnisse immer wieder aus unterschiedlichen Blickwinkeln ausgewertet und publiziert worden sind, werden auch von folgenden Institutionen unterstützt und mitgetragen:

- ◇ **Deutsche Meteorologische Gesellschaft – DMG**
Eine als Verein organisierte Gesellschaft zur Förderung der Meteorologie und der physikalischen Ozeanographie. - Internet: <https://www.dmg-ev.de/>
- ◇ **Deutscher Wetterdienst – DWD**
Der Deutsche Wetterdienst ist als Bundesoberbehörde der nationale zivile meteorologische Dienst der Bundesrepublik Deutschland. Er betreibt das größte und dichteste meteorologische Messnetz in Deutschland und verfügt über die Deutsche Meteorologische Bibliothek als weltweit größte Fachbibliothek zu den Themen Wetter und Klima. - Internet: https://www.dwd.de/DE/Home/home_node.html
- ◇ **Deutsches Klima-Konsortium - DKK**
Dieser als Verein organisierte Verband vertritt die universitären und außeruniversitären Forschungseinrichtungen der Bereiche Klimaforschung und Klimafolgenforschung. - Internet: <https://www.deutsches-klima-konsortium.de/de/ueberuns/verband/das-dkk.html>
- ◇ **Goddard Institute for Space Studies – GISS**
Dieses NASA-Institut der Columbia Universität in New York konzentriert sich besonders auf Forschungen zur globalen Erwärmung und betreibt eine globale Temperaturdatenbank. - Internet: <https://www.giss.nasa.gov/>
- ◇ **Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC**
Der Weltklimarat ist eine Institution der Vereinten Nationen mit Sitz in Genf, für die Wissenschaftler weltweit den aktuellen Kenntnisstand zum Klimawandel zusammentragen. Für Deutschland gibt es die deutsche IPCC-Koordinierungsstelle – de-IPCC. - Internet: <https://www.de-ipcc.de/>
- ◇ **International Association of Broadcast Meteorology - IABM**
Internationaler Interessenverband der Rundfunk und Fernsehgesellschaften, die Informationen zu Meteorologie, Klimaforschung, Wetter und Klimadaten ausstrahlen und dem Publikum diese Informationen verständlich präsentieren wollen. – Internet: <https://www.iabm.org/>
- ◇ **Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie - MeteoSchweiz**
Das Bundesamt ist der staatliche Wetter- und Klimadienst der Schweiz. - Internet: <https://www.meteoschweiz.admin.ch/home.html>

◇ **National Oceanic and Atmospheric Organisation - NOAA**

Die Nationale Ozean- und Atmosphärenbehörde ist eine Behörde der USA. Sie soll alle Ozean- und Atmosphärendienste koordinieren und wird von uniformierten Einheiten unterstützt, die Schiffe und Flugzeuge betreiben und wissenschaftliche Missionen unterstützen. Die NOAA entwickelt und betreibt auch Satelliten zum Erfassen von Wetter- und Klimadaten. - Internet: <https://www.noaa.gov/>

◇ **World Meteorological Organisation - WMO**

Die Weltorganisation für Meteorologie ist eine den Vereinten Nationen angegliederte zwischenstaatliche Sonderorganisation mit derzeit 193 Mitgliedern, die entweder als Staaten oder als Territorien vertreten sind. - Internet: <https://public.wmo.int/en>

◇ **Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik – ZAMG**

Die Zentralanstalt ist eine Forschungseinrichtung des Bundesministeriums für Bildung, Wissenschaft und Forschung der Republik Österreich. - Internet: <https://www.zamg.ac.at/cms/de/aktuell>

Ergebnisse der bisherigen Forschungen zum Thema Klimawandel

Mit all den Messungen und Beobachtungen, die in den letzten Jahrzehnten von vielen verschiedenen Institutionen durchgeführt und veröffentlicht wurden, können derzeit für verschiedene Hauptkomponenten des Klimasystems folgende Veränderungen benannt und als messbare Tatsachen festgehalten werden:

Veränderungen in der Atmosphäre

In der instabilsten Hauptkomponente unseres Klimasystems, in der Lufthülle, wurden im Laufe der beobachteten Zeiträume verschiedenartige Veränderungen gemessen.

► **Die Luft an der Erdoberfläche ist deutlich wärmer geworden**

Die mittlere globale Lufttemperatur an der Erdoberfläche lag im Jahr 2016 um 0,94° C über dem entsprechenden Mittelwert des gesamten 20. Jahrhunderts. Der Vergleich zum Mittelwert der vorindustriellen Zeit von 1850 -1900 zeigt sogar eine größere Differenz von 1,2° C an. Der Temperaturanstieg hat also schon vor dem 20. Jahrhundert begonnen. Weitere Vergleichswerte zeigen, dass die Luft im 21. Jahrhundert bisher in den Jahren 2015 und 2017 um 1,1 ° C und im Jahr 2018 um 1,0 ° C über dem Vergleichswert der vorindustriellen Zeit lag – dies waren auf diesen Parameter bezogen die bisher wärmsten Jahre, wobei die Daten für 2019 noch nicht ausgewertet vorliegen.

► **Temperaturrekorde häufen sich vor allem in den letzten Jahren**

Die seit 1880 ermittelten zehn wärmsten Jahre lagen alle im 21. Jahrhundert. Zusätzlich liegen im Zeitraum der vergangenen 22 Jahre auch die bisher 20 wärmsten Jahre seit dem Beginn des Ermitteln der globalen Mittelwerte. Außerdem gab es seit etwa vier Jahr-

zehnten keinen jährlichen Durchschnittswert mehr, der kühler war als der durchschnittliche Mittelwert des gesamten 20. Jahrhunderts.

► Die Anzahl der Frosttage in Deutschland nimmt ab

Die Tage, an denen die Temperatur lokal unter 0° C absinkt, werden in Deutschland als „Frosttage“ betrachtet. Sie werden über die Stationen des Deutschen Wetterdienstes – DWD zum Erfassen meteorologischer Daten ermittelt. Dabei werden die Lufttemperaturen in 2 m Höhe über dem Boden gemessen. Es zeigt sich, dass die Anzahl der Frosttage pro Kalenderjahr zwischen 1951 und 2015 von durchschnittlich 28 auf 19 Tage abgenommen hat. Zudem wird der Trend beobachtet, dass die Winter milder geworden sind.

► Die Anzahl der heißen Tage in Deutschland nimmt zu

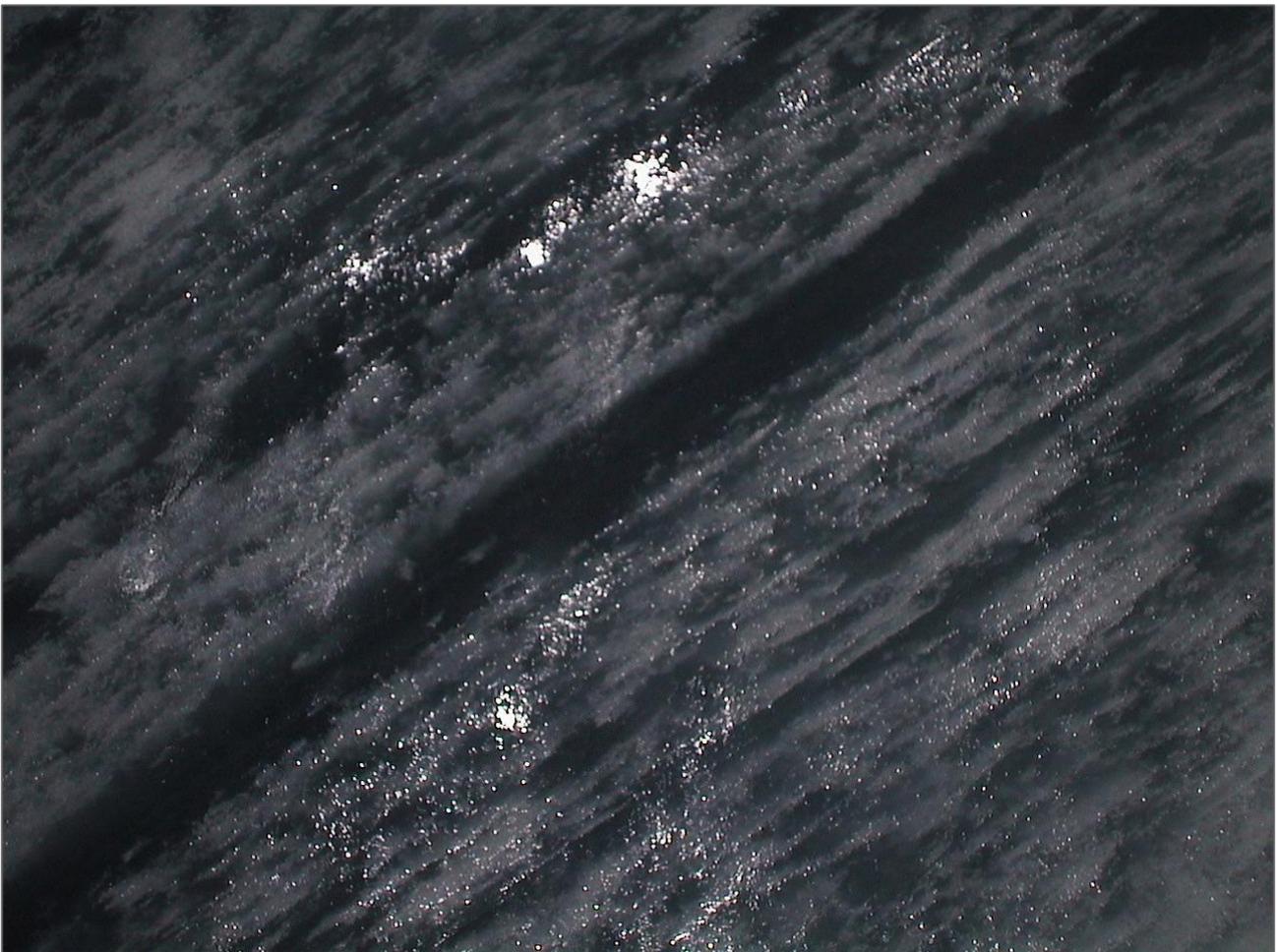
Die Tage, an denen die Temperatur lokal über 30° C ansteigt, werden in Deutschland als „heiße Tage“ betrachtet. Sie werden über die Stationen zum Erfassen meteorologischer Daten des Deutschen Wetterdienstes – DWD ermittelt. Es zeigt sich, dass die Anzahl der heißen Tage pro Kalenderjahr zwischen 1951 und 2015 von durchschnittlich 3 auf 10 Tage gestiegen ist. Es zeigt sich auch, dass die heißen Tage inzwischen nicht mehr allein auf den Sommer begrenzt sind. Im zweitwärmsten Sommer seit 1881, im Jahr 2018, gab es bundesweit insgesamt 20 heiße Tage im Zeitraum zwischen April und September. Zusätzlich sind auch die Spitzentemperaturen an den heißen Tagen angestiegen. So etwa hat sich auch die durchschnittliche Temperatur an den Hitzetagen um etwa 2,3° C erhöht.

► Der Gehalt an Kohlendioxid steigt seit etwa 1850 ständig an

CO₂ ist ein Treibhausgas. Es ist in der Erdatmosphäre als Spurengas enthalten und beeinflusst das Klima der Erde einerseits durch den Treibhauseffekt und andererseits durch seine Löslichkeit in Wasser. Die Wechselwirkungen von CO₂ in der Atmosphäre mit dem Wasser, mit den Gesteinsmaterialien, mit der Lebenswelt - überwiegend über die Pflanzen - sind äußerst vielschichtig. Daher war der CO₂-Gehalt der Atmosphäre auch immer wieder verschiedenartigen Veränderungen unterworfen. Dies gilt auch für die unterschiedlichen Entwicklungen des Planeten im Laufe der Erdgeschichte, in der es immer wieder auch längere Perioden mit annähernd konstanten CO₂-gehalten gab. Insgesamt betrachtet muss dabei festgehalten werden, dass die vielschichtigen Bedingungen in den verschiedenen Erdzeitaltern als Ganzes nie miteinander vergleichbar waren. Für unsere derzeitige Periode können daher nur Vergleichsdaten aus den Zeiträumen verwendet werden, aus denen wir auch vergleichbare Messwerte erhalten können.

Die Zusammensetzung der Atmosphäre früherer Zeiten können wir dort noch messen, wo Luft in den noch vorhandenen Ablagerungen eingeschlossen ist, die zur chemischen Analyse als unverfälschte Probe gewonnen werden kann. Solche Luft ist im Eis von Gletschern oder Eisschilden noch vorhanden und kann auch zur Analyse gewonnen werden. Damit können die Zusammensetzungen der Erdatmosphäre während der letzten 800.000 Jahre gemessen werden.

Es zeigt sich, dass in diesem Zeitraum während der dort stattfindenden Eiszeiten die CO₂-Gehalte in der Atmosphäre in dem Bereich zwischen 180 und 210 ppm (*parts per million = Teile je Million Luftteilchen*) variierten. Während der wärmeren Interglazialzeiten, den Zwischenwarmzeiten innerhalb einer Eiszeit, stiegen die Gehalte auf Werte zwischen 280 und 300 ppm an. Während der letzten etwa 10.000 Jahre blieben die CO₂-Gehalte in der Atmosphäre etwa in dieser Konzentrationsspanne. Der CO₂-Gehalt kann für diesen Zeitraum als stabil betrachtet werden – so lag der CO₂-Gehalt in arktischen Eisbohrkernen für das Jahr 1832 bei 284 ppm. Der vorindustrielle Wert um 1850 liegt bei 280 ppm.



Im Gletschereis zeigen sich unterschiedlich stark verdichtete Eisschichten, in denen Bereiche mit eingeschlossenen Luftteilchen weniger gut durchsichtig wirken. Aus diesen Bereichen kann die Luft gewonnen und analysiert werden.

Von 1850 an ist in den Proben aus den arktischen und antarktischen Bohrkernen ein extremer Anstieg der CO₂-Konzentration in der Atmosphäre zu beobachten. Er erreichte bei der Analyse von Luftproben aus der Atmosphäre im Jahr 2015 das erste Mal den Wert von 400 ppm und im Jahr 2019 den bisherigen Höchstwert von 412 ppm. Zudem scheint sich der Anstieg zu beschleunigen. Im Jahrzehnt von 1960 an lag er bei etwa 0,9 ppm/Jahr, in dem von 2000 an bei etwa 2,0 ppm/Jahr und aktuell wird er für das vergangene Jahrzehnt sogar mit annähernd 3 ppm/Jahr angegeben.

Diese Beobachtungen können mit den Daten der jährlich global emittierten Kohlendioxidmengen korreliert werden. Im Jahr 1960 wurden insgesamt etwa 10 Gt CO₂/Jahr emittiert – im Jahr 2015 waren es mehr als 35 Gt/Jahr. Es könnte daher sinnvoll sein, durch den Einsatz entsprechender Technologien, das Kohlendioxid an entsprechend sinnvollen Stellen aus der Atmosphäre zurück zu gewinnen und in geeigneter Form zur Produktion von synthetischen Treibstoffen zu verwenden. Dann bräuchte der Anteil an fossilem Kohlenstoff in der Atmosphäre nicht weiter anzusteigen. Möglicherweise könnte so künftig auch ein Teil des atmosphärischen Kohlenstoffs diesem Kreislauf entnommen und wieder endgelagert werden.

► **Auch für andere Treibhausgase steigen die Gehalte in der Atmosphäre an**
Neben dem Kohlendioxid gibt es weitere Treibhausgase, deren Gehalt in der Erdatmosphäre derzeit ständig ansteigt:

Methan (CH₄) trägt global derzeit mit etwa 15% zum Treibhauseffekt bei. Die Konzentration dieses Treibhausgases in der Atmosphäre ist im Zeitraum zwischen 1750 und 2010 von 730 ppb (*parts per billion = Teile je Milliarde Luftteilchen*) auf 1.800 ppb um etwa 150% angestiegen.

Lachgas (N₂O) trägt global derzeit mit etwa 8% zum Treibhauseffekt bei. Die Konzentration dieses Treibhausgases in der Atmosphäre ist im Zeitraum zwischen 1750 und 2017 von 270 ppb (*parts per billion = Teile je Milliarde Luftteilchen*) auf 330 ppb um etwa 22% angestiegen.

Als F-Gase werden hauptsächlich zwei Verbindungsgruppen mit jeweils mehreren chemischen Verbindungen zusammengefasst, die auch als Treibhausgase wirken. Es sind die Fluorkohlenwasserstoffe (FKW) und die Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW). Für beide Gruppen und für die dabei hauptsächlich in technischen Prozessen verwendeten Substanzen wurden in den letzten Jahrzehnten Produktions- und Verwendungsrichtlinien vereinbart, um deren Emissionen in die Atmosphäre langfristig vollständig abzubauen. Aufgrund der Verbindungsvielfalt gibt es keine Summenparameter für den Gruppengehalt dieser Treibhausgase in der Atmosphäre. Für einzelne, besonders wirkungsvolle Verbindungen haben wir deren derzeitige Konzentrationen in der Atmosphäre auf dieser Internetseite im Themenbereich Klimafolgen, im Abschnitt „Vorgänge die auf das Klima einwirken“ unter der Überschrift „[Wie Treibhausgase wirken](#)“ genauer aufgeführt. Dennoch kann festgehalten werden, dass diese Substanzen alle menschengemacht sind und daher in der Atmosphäre nicht vorkommen sollten. Dementsprechend sind deren Gehalte während des industriellen Zeitalters grundsätzlich von Null aus angestiegen.

Veränderungen in der Hydrosphäre

Diese Hauptkomponente unseres Klimasystems ist stabiler als die Atmosphäre. Es gibt jedoch etliche Wechselwirkungen zwischen den flüssigen und beweglichen Wassermassen und der Lufthülle. Daher wurden im Laufe der beobachteten Zeiträume auch in den Ozeanen verschiedenartige Veränderungen beobachtet und gemessen.

► **Auch das Wasser in den Weltmeeren ist wärmer geworden**

Natürlicherweise wird das Wasser in den Ozeanen im Bereich der obersten lichtdurchfluteten Wasserschichten am stärksten erwärmt. Jahreszeitliche Schwankungen werden für diese Trendbetrachtungen über das Ermitteln entsprechender Jahresmittelwerte ausgeglichen. Es zeigt sich, dass die oberflächennahen Wasserschichten bis etwa 75 m Wassertiefe im Zeitraum zwischen 1971 und 2010 global durchschnittlich um 0,11° C pro Dekade wärmer geworden sind. Dies trifft nicht auf alle regionalen Meeresbereiche zu, da sich auch Einflüsse aus der Umgebung und von weitreichenden globalen Strömungssystemen lokal auswirken können. So ist beispielsweise in dieser Zeit im Nordatlantik die Wassertemperatur, aber - in der Nähe von Grönland und der Labrador-See - auch der Salzgehalt in diesen Wasserschichten sogar gesunken. In anderen Weltgegenden gibt es - mit anderen lokalen Einflüssen - auch Beispiele für überproportionale Temperaturanstiege in diesen Wasserschichten.

► **Die Ozeane nehmen derzeit einen Teil der Erderwärmung auf**

Im Klimasystem unserer Erde wird derzeit aufgrund der Wirkung der Treibhausgase in der oberen Atmosphäre mehr Wärmeenergie festgehalten. Die Zusammenhänge dazu haben wir auf dieser Internetseite im Themenbereich Klimafolgen, im Abschnitt „Vorgänge die auf das Klima einwirken“ unter der Überschrift „[Wie Treibhausgase wirken](#)“ genauer beschrieben. Wasser hat allerdings eine höhere Wärmekapazität als Luft und kann daher auch mehr Wärme aufnehmen. Die Lufthülle der Erde entspricht in diesem Zusammenhang einer etwa 10 m dicken Schicht aus Meereswasser. Dazu kommt, dass die Ozeane im rechnerischen Durchschnitt etwa 3.680 m tief sind, sodass die Meere rein rechnerisch die 367-fache Menge an Wärmeenergie aufnehmen könnten. In der Praxis wird diese Aufnahmefähigkeit durch andere Zusammenhänge und Prozesse aber wesentlich reduziert. Schon allein die Beobachtung der Korallenbleiche und des Korallensterbens bei lokal nur geringen Erhöhungen der Meerestemperatur zeigt, dass hier noch viele Grenzen nicht bekannt sind und bald erkundet werden müssten.

Tatsache bleibt, dass unsere Atmosphäre nur etwa 2% der Wärmekapazität unseres Planeten hat und die Ozeane wesentlich mehr Wärme aufnehmen können. Der Wärmeinhalt der Ozeane wird als die Größe OHC (*Ocean Heat Content*) berechnet und im Vergleich zu einem Referenzwert angegeben. Da die Ozeane mehr als 70 % der Oberfläche unserer Erde bedecken, haben sie einen großen Einfluss auf unser Wetter und das Klima. Sie nehmen die auf sie einstrahlende Sonnenenergie auf und wirken zusätzlich über verschiedene Prozesse auch als Klimapuffer. Damit dämpfen sie die klimatische Wirkung der Treibhausgase ab. Ob dies ständig und weiter ansteigend so weitergehen kann wird in der Wissenschaft bezweifelt. Es gibt inzwischen einige Hinweise, dass auch diese Wärmeaufnahmefähigkeit an irreversible Grenzen stößt und es auch dort Kipp-Punkte gibt, die noch nicht wirklich erforscht und bekannt sind. Als Beispiel mag hier nur der Einfluss höherer Wassertemperaturen auf die in den Kontinentalabhängigen lagernden Vorräte an Methanhydraten dienen. Eine möglicherweise damit verknüpfte zusätzliche Methan-

emission in die Atmosphäre könnte von einer gewissen Grenztemperatur des Meerwassers an nicht mehr verhindert werden!

► Der Meeresspiegel steigt weltweit an

Im Laufe der Erdgeschichte gab es immer wieder erhebliche Schwankungen des Meeresspiegels. Zuletzt war die Erde vor etwa 70 Millionen Jahren völlig frei von Eiskappen an den Polen. Der Meeresspiegel lag zu dieser Zeit etwa 70 m oberhalb des derzeitigen Niveaus. Vor etwa 120.000 Jahren lag während der letzten Kaltzeit der Meeresspiegel um etwa 120 m unterhalb des derzeitigen Niveaus. Diese Informationen zeigen, dass wir bei einem Temperaturanstieg und einem Abschmelzen von Eis bei den bestehenden Gletschern allen bestehenden Eis-schilden auch mit einem größeren Ansteigen des Meeresspiegels rechnen sollten.

Durch die seefahrenden Nationen wurden seit etwa 1820 Pegelstände aus verschiedenen Hafenstädten dokumentiert. In der Folgezeit wurden immer mehr Pegelorte dazugenommen, sodass nach und nach ein Messnetz entstand. Meeresspiegelstände wurden daher immer als Pegelstände dokumentiert. Aus diesen Aufzeichnungen wurden dann auch jährliche Mittelwerte errechnet, die zum Beobachten des durchschnittlichen Meeresspiegelpegels verwendet wurden. In diese Beobachtungen und Messwerte flossen jedoch überall dort, wo sich der Untergrund des Pegelortes durch geologische Kräfte langsam anhob oder absenkte, diese Bewegungen mit ein. Daher gab es regional unterschiedlich starke Beobachtungsfehler, solange es nicht möglich war, diese genau zu messen und in die Messwerte zu integrieren. Seit 1995 werden die Meeresspiegellagen über die Satellitenbeobachtungen der Erdoberfläche beobachtet. Dies ermöglichte es auch, Bewegungen der Landoberflächen in der Nähe der Pegelstandorte zu messen und diese Daten dann mit den Messungen der Meeresoberflächen und mit den vorangegangenen Pegelstandsmessungen zu korrelieren.

Als Ergebnis dieser umfangreichen Untersuchungen wurde festgestellt, dass von der Mitte des 19. Jahrhunderts an ein deutlicher Anstieg des mittleren Meeresspiegels verzeichnet werden muss. Er ist im Zeitraum zwischen 1870 und 2009 um etwa 25 cm angestiegen. Das NASA Goddard Space Flight Center gibt aus Satellitendaten für den Zeitraum zwischen 1993 und 2018 einen durchschnittlichen Anstieg um 3,3 mm/Jahr an. Für den Zeitraum zwischen 1901 und 2010 wurde nur ein durchschnittlicher Anstieg von 1,7 mm/Jahr erkannt. Der Meeresspiegel scheint inzwischen schneller anzusteigen.

Es werden derzeit zwei Ursachen für den Meeresspiegelanstieg erkannt:

- Aufgrund der wärmeren Atmosphäre schmelzen durch die gestiegenen Lufttemperaturen Gletscher und Eisschilde und es wird Süßwasser vom Festland in die Ozeane verlagert - der Meeresspiegel steigt.
- Aufgrund der Erwärmung der Ozeane muss sich über den Ausdehnungskoeffizienten das Wasser in den Ozeanbecken ausdehnen und braucht als wärmeres Wasser mehr Raum - der Meeresspiegel steigt.

► **Die Ozeane nehmen immer schneller einen saureren Charakter an**

Der pH-Wert des Meereswassers wird kleiner. Dies bedeutet, dass das Meerwasser saurer wird und daher – nach der Definition des pH-Werts - einen größeren Säurecharakter annimmt. Der pH-Wert 7 ist als neutral definiert, er ist weder basisch noch sauer. Die Ozeane sind bisher an der Oberfläche leicht basisch und für den Zeitpunkt vor der Industrialisierung wird in vielen Quellen ein pH-Wert von 8,25 angegeben. Aus früheren Untersuchungen wird für das Jahr 1870 an der Meeresoberfläche ein pH-Wert von 8,2 aufgeführt. Danach gab es dann immer mehr Daten und das Bild wurde durch viele Untersuchungen und neu dazugekommenes Wissen komplizierter. Da auch lokale Einflüsse wie Meeresströmungen sowohl entlang der Oberfläche der Ozeane, als auch zwischen den unterschiedlichen Tiefenbereichen, wie veränderliche Salzgehalte durch Süßwasserzuflüsse, wie starke Sonneneinstrahlung in verschiedenen geographischen Bereichen alle den pH-Wert beeinflussen, müssen für Vergleiche komplexere Mittelwerte gebildet werden. Daran zeigt sich ein genereller Trend hin zu abnehmenden pH-Werten.



Korallen sind ortsfeste Organismen, die in Symbiose mit photosynthetisch aktiven Algen in den Ozeanen leben. Diese Symbiose wird durch zu hohe Wassertemperaturen und/oder bei zu stark saurem Charakter des umgebenden Meerwassers gestresst und die Algen werden abgestoßen. Dabei verlieren die Korallen ihre Farben und sterben dann mit der Korallenbleiche ab, da ihnen die von den Algen erzeugten Nährstoffe fehlen.

In den vergangenen etwa 7,5 Millionen Jahren lag der pH-Wert des Meerwassers – der über Isotopenzusammensetzungen von Borhydroxiden in Sedimenten bestimmt werden

kann – annähernd konstant bei etwa 8,2. Erst nach dem Beginn der Industrialisierung begann der pH-Wert zu sinken und ist nach einer Zusammenstellung der Royal Society, der 1660 gegründeten britischen Akademie der Naturwissenschaften, aktuell auf einen Mittelwert von 8,08 gesunken. Dabei wird festgestellt, dass der pH-Wert im lichtdurchfluteten obersten Abschnitt der Ozeane im Tiefenbereich von 0 bis 50 m durch lokale und temporäre Einflüsse im Wertebereich zwischen 7,9 und 8,25 schwanken kann.

Der CO₂-Gehalt in der Atmosphäre steigt an. Dies bedeutet, dass der Druck, den das Gewicht des CO₂-Anteils auf den Untergrund ausübt, stärker wird. Etwa 70% der Fläche unter der Atmosphäre sind Meeresoberfläche. Da CO₂ auch im Meerwasser gelöst ist, gibt es dort auch einen Druckanteil des im Meerwasser gelösten CO₂-Anteils. Beide Druckanteile, der im Meerwasser und der in der Atmosphäre, suchen immer den Druckausgleich, damit sich der Teil- oder Partialdruck von CO₂ an der Grenzfläche zwischen Luft und Wasser im Gleichgewicht befindet. Dies bedeutet für den in der Atmosphäre höheren CO₂-Partialdruck, dass die Ozeane Kohlendioxid aus der Atmosphäre aufnehmen. Die mögliche Menge an CO₂, die das Meerwasser aufnehmen kann, hängt allerdings vor allem von der Löslichkeit im Meerwasser ab, die wiederum lokal von der jeweiligen Temperatur, dem Druck, der Zusammensetzung und dem Salzgehalt beeinflusst wird. Global betrachtet stellt das Meerwasser aber eine CO₂-Senke dar, in der Kohlendioxid solange zwischengelagert wird, bis sich die Verhältnisse wieder verändern.

Insgesamt betrachtet wurden seit dem Beginn der Industrialisierung bisher etwa 30% der anthropogenen CO₂-Emissionen, oder geschätzte 120 Gt (*Gigatonnen*) Kohlenstoff, von den Ozeanen aufgenommen. Die Gesamtmenge des derzeit in der Hydrosphäre unseres Planeten gespeicherten Kohlenstoffs wird derzeit auf etwa 38.000 Gt geschätzt. Die marinen Systeme sind immer so eingestellt, dass sie sich um einen natürlicherweise angestrebten Gleichgewichtszustand bewegen. Daher muss angenommen werden, dass auch schon vergleichsweise geringe Stoffmengen, die zusätzlich in die bestehenden Systeme eingespielt werden, grenzwertige Auswirkungen und entsprechende Folgewirkungen erzielen können.

Zusätzlich muss beachtet werden, welchen Einfluss die Veränderungen in der Chemie der Ozeane auf die dort angesiedelten Lebewesen ausüben. Werden die Lebenswelten in den Ozeanen durch die Versauerung berührt und sind auch in den Meeren Anzeichen erkennbar, die Einflüsse auf die Artenvielfalt und auf die Diversität des Lebens im Meer hinweisen? Dazu muss festgehalten werden, dass es bisher zwar kein Gesamtbild gibt, aber dass verschiedene Einflüsse beobachtet werden, die auch auf Auswirkungen durch ein Versauern des Meeresswassers zurückzuführen sind. Grundsätzlich gilt, dass sich bei einem CO₂-Eintrag ins Meerwasser, dort auch ein höherer Kohlensäureanteil ergibt. Dies kann bei kalkbildenden Organismen zu Problemen beim Ausbilden der Kalkskelette führen. Davon sind dann vor allem ortsfeste Organismen wie beispielsweise Korallen betroffen. Offenbar wirken dabei sowohl die Erwärmung, als auch die Versauerung des Meerwassers zusammen. Bei nicht ortsfesten Organismen sind in den obersten Meeres-

bereichen vor allem die kalkskelettbildenden Einzeller wie Algen und Foraminiferen betroffen. Es gibt auch Auswirkungen auf mehrzellige Meeresbewohner wie Fische, da ein Versauern des Wassers auch auf die Zellinhalte wirken kann. Bei manchen Fischen gibt es Hinweise darauf, dass die Fortpflanzungsfähigkeit und das Wachstum beeinträchtigt werden. Bei manchen Korallenfischen gibt es Hinweise auf eine Beeinträchtigung des Geruchssinns. Insgesamt betrachtet ist zu diesen Themen noch viel weitere Forschung erforderlich.

Veränderungen in der Kryosphäre

Die Kryosphäre ist die Hauptkomponente unseres Klimasystems, in dem das Wasser im festen – also gefrorenem – Zustand vorliegt. Dazu gehören das Eis der Eiskappen, das Eis der kontinentalen Eisschilde, das Gletschereis, das Eis auf Flüssen und Seen, das Eis der gefrorenen Permafrostböden, das Meereis und die mit Schnee bedeckten Areale. Aus dieser Definition wird deutlich, dass die Kryosphäre den jahreszeitlichen Schwankungen entsprechend, in den verschiedenen geographischen Bereichen jeweils unterschiedlich große Areale erfassen muss.

► Der grönländische Eisschild verliert immer mehr Eis

In Grönland zeigen sich im Sommer auf der Eisoberfläche immer mehr blaue Flecken. Das Schmelzwasser sammelt sich in Seen auf dem Eis. Es fließt dann durch Eisrinnen und auf dem Eis oder durch tiefgreifende Spalten unter die Gletscher und dort auf der Felsoberfläche zur Küste. Dies führt auch zu einem schnelleren Abfließen der Gletscher und auf den umgebenden Meeresbereichen zu einem verstärkten Gletscherkalben und zum Abbrechen größerer Eisberge.

Im Zeitabschnitt von 1992 – 1997 gingen jährlich etwa 18 Mrd. t Eis verloren. In den Jahren 2012 – 2017, also nur 20 Jahre später, waren es jährlich etwa 239 Mrd. t. Insgesamt hat der Eisschild in Grönland seit 1992 bisher etwa 3.800 Mrd. t Eis verloren. Dies hat zu einem Meeresspiegelanstieg von etwa 10,6 mm geführt.

► Das arktische Meereis in der nördlichen Polregion wird weniger

Seit Oktober 2019 driftet das Forschungsschiff Polarstern auf der Forschungsmission MOSAIC, eingefroren im Eis, quer durch die zentrale Arktis. Mit dieser Forschungsreise soll das Klimasystem in der Zentralarktis erforscht werden. Das Meereis in der Arktis ist ein in sich dynamisches System, in dem sich verschiedene Eisschollen auch gegeneinander bewegen. Inzwischen gibt es auch in der Nähe des Nordpols Zonen mit ganz dünnem Eis, mehrere Meter dicke Schollen und manchmal auch offene Wasserflächen zwischen den Schollen.

In den Nordmeeren zeigt die Meereisbedeckung jahreszeitliche Schwankungen zwischen etwa 3,5 Millionen km² am Ende des arktischen Sommers im September und etwa 15 Millionen km² am Ende des arktischen Winters im April. Dies bedeutet, dass in jedem Sommer bis zu $\frac{3}{4}$ des gesamten Meereises schmilzt und im Laufe des Winters wieder entsteht. Diese Ausdehnungen können seit den 1970er Jahren über die Beobachtung via

Satelliten gut vermessen werden. Dabei zeigt sich eine generelle Abnahme der Meereisbedeckung. Für das spätsommerliche Minimum des September wird sie derzeit mit etwa 8% für jedes Jahrzehnt angegeben. Zusätzlich wurden durch verschiedene andere Untersuchungen auch Veränderungen in der durchschnittlichen Eisdicke festgestellt, die im Zeitraum zwischen 1950 und 2000 von 3,1 m auf 1,8 m abgenommen hat. Damit verbunden ist auch eine Abnahme des Gesamtvolumens des nördlichen Meereises. Für das spätsommerliche Minimum im Zeitraum zwischen 1980 und 2010 hat sich dieses Gesamtvolumen von etwa 20.000 km³ auf etwa 4.000 km³ verkleinert.

Mit der Abnahme des Meereises geht auch eine Verringerung des Rückstrahlvermögens von diffus reflektierenden Oberflächen einher, da die weiße Oberfläche des Meereises ein größeres Rückstrahlvermögen hat, als die offenen Wasserflächen. Es kann durch die Abnahme der Albedo in der Nordpolarregion weniger einstrahlende Energie in den Weltraum zurückreflektiert werden.

► Gletscher und Schneebedeckungen schwinden



Die im Bildvordergrund sichtbaren Gletscherschrammen auf dem Felsenuntergrund zeigen, dass sich der im Hintergrund noch sichtbare, aber schon an der Front stark ausgedünnte Gletscher weiter zurückzieht. Dies zeigen auch die auf der Gletscheroberfläche sichtbaren Rinnen, in denen das Tauwasser abfließt. Das Bild zeigt den Zustand des Athabasca-Gletschers in den kanadischen Rocky-Mountains im Herbst 2015.

Die meisten Gebirgsgletscher verlieren an Eismasse und ziehen sich langsam zurück. Zu beobachten ist dies meist damit, dass die Eisdicke der Gletscher abnimmt und die Fläche, die ein Gletscher einnimmt, kleiner wird. Beispielsweise gab es um 1970 in den Alpen etwa 5.150 Gletscher mit einer Gesamtfläche von 2.903 km². In einer Studie über die Entwicklung dieser Gletscher in der Zeit zwischen etwa 1850 und 1970 wird festgestellt, dass in dieser Zeitspanne bereits das Eis auf etwa 35% der ursprünglich bestehenden Gletscherfläche verschwunden war. Diese Entwicklung hat sich bis zum Jahr 2000 auf etwa 50% der ehemals vorhandenen Gletscherfläche fortgesetzt. Dies bedeutet, dass zum Beginn dieses Jahrhunderts in den Alpen bereits die Hälfte der vor der Industrialisierung durch Gletscher bedeckten Fläche durch den Rückzug des Eises freigelegt wurde.

Mit Hilfe von Satellitenbildanalysen können auch die Veränderungen in der Schneebedeckung beobachtet werden. Auch die Schneebedeckung auf den großen Landmassen der Nordhalbkugel schwankt im jahreszeitlichen Wechsel. Gegen Ende August sind durchschnittlich etwa 1 Mil. km² mit Schnee bedeckt, während im Februar große Schneeflächen von bis zu 50 Mil. km² auftreten können. Bis zu 98% des Schnees befindet sich auf der Nordhalbkugel, während auf der Südhalbkugel durchgängige Schneedecken nur in den Gebirgsbereichen anzutreffen sind.

Die Messung von Schneebedeckungen auf der Nordhalbkugel wurden während der letzten 40 Jahre regelmäßig satellitengestützt durchgeführt. Dabei hat sich gezeigt, dass sie derzeit dort abnehmen. Dies wird als generell beobachteter Trend der letzten Jahre gesehen. In der Zeitspanne zwischen 1972 und 2003 hat die Schneebedeckung um etwa 10% abgenommen. Aufgrund der annähernd gleichgebliebenen Niederschlagsmengen kann die beobachtete Abnahme der schneebedeckten Fläche auf den Anstieg der Durchschnittstemperatur zurückgeführt werden.

Ob mit der Abnahme der schneebedeckten Flächen generell auch weniger Schnee fällt, kann daraus nicht gefolgert werden. Für diese Beobachtungen standen keine Daten über die lokalen Schneedicken zur Verfügung. Weiterhin wurde beobachtet, dass auch die Dauer der Schneebedeckung auf der Nordhalbkugel abgenommen hat. Die durchschnittliche Schneesaison beginnt derzeit inzwischen etwa 12 Tage später und endet etwa 25 Tage früher als noch 1970.

Veränderungen in der Biosphäre

In unserem Klimasystem umfasst die Hauptkomponente Biosphäre alle von Lebewesen besiedelten Bereiche unseres Planeten. Dazu gehören die besiedelten Bereiche der obersten Erdkruste (der Lithosphäre und der Pedosphäre), die gesamte Hydrosphäre, da auch die tiefsten Meeresbereiche besiedelt sind, sowie der unterste Bereich der Atmosphäre, die auch als planetare Grenzschicht bezeichnet wird.

► Die Vegetationsperioden verschieben sich

Sowohl die Veränderungen hin zu durchschnittlich wärmeren Temperaturen, als auch die Veränderungen bei den Niederschlägen hin zu insgesamt feuchteren Winterperio-

den und zu trockeneren Sommerperioden, haben offenbar einen Einfluss auf die Vegetation. Im entsprechend thematisch aufgebauten Beobachtungsnetz des Deutschen Wetterdienstes - DWD wurde festgestellt, dass sich im Zeitraum zwischen 1950 und 2000 die Vegetationsperioden wichtiger Laubbäume um durchschnittlich 2,3 Tage je Jahrzehnt verlängert hat. Dabei zeigt sich auch, dass der Austrieb für verschiedene Pflanzenarten inzwischen wesentlich früher erfolgt. Dies kann bei Nutzpflanzen auch dazu führen, dass Blüten durch späte Frosttage erfrieren können und damit die Ernteerträge beeinflusst werden. Ein negativer Einfluss auf den Menschen zeigt sich dabei in einer verlängerten Pollenflugsaison, auf die sich pollenempfindliche Allergiker einstellen müssen.

► Verbreitungsgebiete und Populationen von Pflanzen verändern sich

Die Veränderungen hin zu durchschnittlich höheren Temperaturen und hin zu anderen Niederschlagsmengen wirken langfristig auch auf die Zusammensetzungen der Pflanzenpopulationen ein. Pflanzenarten, die sich den Veränderungen nicht schnell genug anpassen können sterben lokal aus und folgen über ihr Verbreitungsgebiet den Lebensräumen, an die sie entsprechend angepasst sind. So wird beispielsweise festgestellt, dass sich auch bisher eher aus dem mediterranen Raum bekannte Pflanzenarten wie einige Blumen, Gräser und Disteln inzwischen in verschiedenen Bereichen Deutschlands als Neophyten lokal eingebürgert haben.

► Die Artenvielfalt schwindet und neue Gefahren entstehen

In vielen Bereichen der Erde verändert sich die natürliche Umwelt von Pflanzen und Tieren durch klimatische Verschiebungen. Diese sind in ihrem Umfang jedoch nicht immer allein auf natürliche Vorgänge zurückzuführen. Teilweise greifen auch Aktivitäten der Menschen als Anpassung an veränderte Bedingungen stark in die Umwelt ein. Durch seine Ausbreitung und seine Einflüsse auf die natürliche Umwelt vieler tierischer Populationen beeinflusst der Mensch immer mehr intakte Ökosysteme. Dies hat großen Einfluss auf die Artenvielfalt in solchen Systemen, die dabei immer mehr abnimmt – es gibt in derart beeinflussten Ökosystemen auch in der Tierwelt immer weniger Arten. Dies wird von weltweiten Forschungen bestätigt.

In Populationen, die von den Eingriffen des Menschen noch unbeeinflusst erscheinen, sind die Tierarten und die einzelnen Tiere gut durchmischt und im Ökosystem gut verteilt. Für Viren bedeutet dies, dass sie nur schwer passende Wirtstiere finden und damit ihre Verbreitung auf natürliche Weise angehalten wird.

In Populationen, deren Artenvielfalt durch den Eingriff der Menschen in die natürliche Umwelt reduziert wurde, treffen Wirtstiere häufiger aufeinander und Viren können sich besser ausbreiten. Wenn der Einfluss der Menschen durch Ackerbau und Nutztierhaltung immer stärker in die Umwelt eingreift und die Artenvielfalt weiter dezimiert wird, können sich auch die Viren gut ausbreiten – möglicherweise können manche Mutationen auch auf Nutztiere überspringen.

Auf Märkten in China und in Afrika, wo verschiedenartigste Wild- und Nutztiere oder das Fleisch solcher Tiere zerkleinert, teilweise halbroh abgelegt und gehandelt wird, können solche Viren auch auf den Menschen übertragen werden. Krankheiten die den Menschen auf diese Weise erreichen, werden als Zoonosen bezeichnet.

► Die Frühjahrsaktivitäten in der Tierwelt finden früher statt

Vor allem die Veränderungen bei den Temperaturen führen im Tierreich zu zahlreichen Reaktionen, die auf den sich langsam vollziehenden Klimawandel zurückgeführt werden müssen. So hat sich das Laichen einiger Amphibienarten – wie beispielsweise auch beim Laubfrosch - und das erste Auftreten von Schmetterlingen nach früher im Jahr verschoben. Dies gilt auch für die Brutzeit einiger Vogelarten, die inzwischen sowohl in Europa, als auch in Nordamerika um bis zu 14 Tage früher brüten als dies noch vor 30 Jahren der Fall war. Auch bei den Zugvögeln zeigt sich, dass sie später wegziehen und früher wieder zurückkommen. Dabei wurde auch festgestellt, dass sich für manche Arten die Zugstrecken verkürzt haben. Einige Arten haben auch schon damit begonnen, manchmal im Brutgebiet zu überwintern. Manche südeuropäischen Tierarten haben inzwischen auch ihre Verbreitungsgebiete weiter nach Norden ausgedehnt und wandern in Mitteleuropa ein, wie beispielsweise die Feuerlibelle.

► Wechselbeziehungen werden gestört

Durch die beobachteten Veränderungen in der Pflanzenwelt und in der Tierwelt können auch unterschiedliche Wechselbeziehungen zwischen verschiedenen Organismen gestört werden. So wurde beobachtet, dass in manchen Jahren die früher im Jahr auftretende Blütezeit einiger Pflanzen nicht mehr zur Flugzeit mancher bestäubenden Insekten passt. Aus China wird dazu berichtet, dass in manchen Gegenden die Blüten dann von den Menschen händisch bestäubt werden müssen.

Veränderungen in der Pedosphäre

Die Hauptkomponente Pedosphäre umfasst im Bereich der Landoberflächen alle Böden und Bodenarten. Die Böden stellen grundsätzlich an der Erdoberfläche einen Grenzbereich dar, in dem sich verschiedene Hauptkomponenten des Klimasystems mit lokal unterschiedlichen Anteilen durchdringen und gegenseitig beeinflussen. In der Pedosphäre können sich Einflüsse der Atmosphäre, der Hydrosphäre, der Biosphäre und der Lithosphäre auswirken.

► Es gibt längere Dürreperioden und die Gefahr von Waldbränden

Wenn es über längere Zeitabschnitte nicht regnet, fehlt Wasser in den oberen Bodenschichten, in denen die Pflanzen wurzeln und aus denen die Pflanzen ihre Nährstoffe gewinnen. Zudem könnte es über die Erwärmung der bodennahen Luftschichten auch zu einem Austrocknen der Böden kommen. Verschiedene Messreihen der Bodenfeuchten, Messreihen der Niederschlagsmengen, verschiedene Messdaten zu den Verdunstungsraten und weitere Beobachtungen zu den Pegelständen der Flüsse und Talsperren erlau-

ben es von etwa 1950 an ein genaueres Bild von der Dürreentwicklung in Deutschland und in Europa zu erkennen. Im Zeitraum zwischen 1950 und 2010 hat es in Europa 21 größere Dürren gegeben. Allein sechs dieser Trockenperioden lagen im 21. Jahrhundert und weitere Dürrejahre lagen in den Sommerhalbjahren nach 2010. Auch die beiden letzten Sommer in den Jahren 2018 und 2019 werden als Trockenperioden mit lokal hohen Temperaturen in Deutschland und Europa betrachtet.

Je nach der Dauer der verschiedenen Trockenperioden steigt auch in Deutschland in verschiedenen Bereichen die Brandgefahr. Dabei ist es auch zu lokalen Waldbränden gekommen. Beim Auftreten von mehreren trockenen Sommern hintereinander brauchen die unteren Bodenbereiche – wie im Beispiel der Jahre 2018 und 2019 – auch länger als einen Winter, um den ursprünglichen Zustand wieder zu erreichen.

► **In Dürreperioden trocknen auch tieferliegende Bodenbereiche aus**

In den trockenen und heißen Sommermonaten werden in Deutschland die Flüsse, Kanäle und Seen aufgrund des fehlenden Regens hauptsächlich durch den Zustrom von Grundwasser gespeist. Damit entwässern auch die unteren Bodenbereiche stärker. Diese Wasservorräte werden jedoch nur langsam wieder aufgebaut. Dazu ist es allerdings erforderlich, dass in den Winterperioden die entsprechenden Niederschlagsmengen fallen. Wenn diese nicht ausreichen, kann sich der Wassermangel in den Böden auch über längere Zeiträume hinweg festsetzen. Dies hat dann auch Auswirkungen auf die Bodenfeuchte und den Pflanzenbewuchs an der Oberfläche. Solche Austrocknungen können einerseits die Abwehrkräfte von Pflanzen gegen angreifende Schädlinge schwächen und andererseits die Gefahr von Flächenbränden in den trockenen Monaten erhöhen.

FiWiSo-Allianz

rnl im März 2020

Bilder: copyright rnl

Fortsetzung in:

Was Messdaten derzeit aussagen – Teil 2 (mit Literaturhinweisen)

bitte auf folgender Seite unterhalb von „Weltweit erkannte Veränderungen“ öffnen:

<https://www.fiwiso-allianz.de/240/klimafolgen>