

Rüdiger Schacht

# Wann bekommen die Küsten- bewohner denn nun nasse Füße?

SACHBUCH



Springer Spektrum

---

Wann bekommen die Küstenbewohner denn nun nasse Füße?

---

Rüdiger Schacht

# Wann bekommen die Küstenbewohner denn nun nasse Füße?

Rüdiger Schacht  
Lüneburg, Deutschland

ISBN 978-3-658-00326-5  
DOI 10.1007/978-3-658-00327-2

ISBN 978-3-658-00327-2 (eBook)

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Springer Spektrum

© Springer Fachmedien Wiesbaden 2014

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier.

Springer Spektrum ist eine Marke von Springer DE. Springer DE ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media

[www.springer-spektrum.de](http://www.springer-spektrum.de)

---

## Vorwort

Alarm, die Klimakatastrophe ist da:

„Der Nordpol ist weg“,  
„Weltweit dehnen sich die Wüsten aus“, und  
„Rieseneisberg in der Antarktis abgebrochen“.

Dann, ein paar Wochen später:

„Der Golfstrom stockt“,  
„Der Eisschild der Antarktis wächst“ und  
„Die nächste Eiszeit steht vor der Tür!“

Und noch ein paar Wochen später:

„Die Klimakatastrophe findet doch nicht statt.“

Widersprüchliche Schlagzeilen wie diese rauschen seit Jahren durch den Blätterwald machen den Leser verrückt. Verwundert – und zunehmend entnervt und frustriert – bleibt er angesichts solch irritierender Aussagen alleingelassen: Ja was denn nun? Kommt die Klimakatastrophe oder kommt sie nicht? Und was ist eigentlich los mit der Forschung? Vermag sie nicht einmal eine eindeutige Position zu beziehen?

Zugegeben, es ist nicht leicht mit dem Klimawandel. Ein Puzzle mit tausenden von Teilen, die oft gar nicht so recht zueinander passen wollen. Hinzu kommen immer neue verwirrende und zum Teil gegensätzliche Berichte in den Medien sowie prozentuale Eintrittswahrscheinlichkeiten eines Ereignisses. Wie soll man als Normalbürger, der es gewohnt ist, mit handfesten Größen wie etwa Euro und Cent zu rechnen, mit derartigen Aussagen zurechtkommen?

Keine Frage, bei der Diskussion und Berichterstattung über den Klimawandel wurden – und werden noch immer – Fehler gemacht. Was so vielen Diskussionen über den Klimawandel aber leider häufig fehlt, ist ein einigermaßen solider Grundstock von Wissen um die Datengrundlagen und Zusammenhänge.

Viel zu schnell und viel zu oft werden in dem emotional stark aufgeheizten Umfeld der Klimadebatte die unterschiedlichsten Dinge in einen Topf geworfen und – Faktenlage hin,

Faktenlage her – daraus dann die Schlüsse gezogen, die am besten in das eigene Weltbild passen. Viel zu selten machen sich viele Diskussionsteilnehmer und auch mediale Bericht-erstatte die Mühe, wirklich genau hinzusehen, worum es bei einer neuen Nachricht im Kern eigentlich geht.

Und das fängt schon damit an, dass oft nicht zwischen Wetter und Klima unterschieden wird. Aus dem Bauchgefühl und dem alltäglichen Erleben des Wetters vor der eigenen Haustür werden häufig Behauptungen in den Raum gestellt, die bei näherer Betrachtung überhaupt nichts mit dem Klima zu tun haben, sondern sich auf die Phänomene des Wetters und seiner Variationen beziehen.

Schade ist, dass gerade auch die Medien auf ihrer ständigen Suche nach Neuigkeiten und Schlagzeilen begierig fast alles aufnehmen, was ihnen vor die Füße geworfen wird, und es – oft kaum reflektiert – veröffentlichen. Egal ob blanker (aber von immer professioneller arbeitenden PR-Agenturen gut verkaufter) Unsinn, bloße Hypothese oder tatsächlich bahnbrechende neue Erkenntnis: bloß nichts verpassen, der Konkurrenz überlassen und die entsprechenden Neuigkeiten herausbringen – am liebsten natürlich exklusiv. Wer den Medienbetrieb kennt, weiß, unter welchem enormen Zeit- und Kostendruck heute Journalisten stehen, und hat eine Idee davon, warum so viele Dinge nur mehr oder minder reflektiert übernommen und veröffentlicht werden. Das ist schade, denn eigentlich war gerade die seriöse Gewichtung und Einordnung von Neuigkeiten einmal das Erkennungsmerkmal des Qualitätsjournalismus schlechthin.

Aber sei's drum. Lässt sich dieser Zustand bei Geschichten zu alltäglichen Themen vielleicht noch als „wenig schön“ abtun, so führt das unreflektierte Berichten über den Klimawandel leider dazu, dass immer mehr Menschen sich genervt von dem so wichtigen Thema abwenden und gar nichts mehr glauben.

Ist es gerade auch hier in Deutschland weitgehend Konsens, dass es einen Klimawandel gibt, sieht das in anderen Ländern, wie etwa den Vereinigten Staaten von Amerika, ganz anders aus. Kein Wunder, denn sowohl die Politik unter George W. Bush als auch die mächtige Ölindustrie hielten das Thema weitestgehend aus den Medien heraus und sorgten mit viel Geld und einer mächtigen PR-Maschinerie dafür, dass die Ergebnisse der US-Forschung nicht an die breite Öffentlichkeit gelangten. Erst nach der „Jahrhundertdürre“ des Sommers 2012 und Hurrikan „Sandy“, der Anfang Dezember 2012 Teile der Neuenglandstaaten und New Yorks verwüstete, scheint die Klimadebatte in den USA allmählich an Fahrt aufzunehmen – aber man wird sehen.

So weit, so gut – das Klima verändert sich also. Immerhin ist diese Gewissheit nun weitgehend in der Gesellschaft angekommen. Ganz anders sieht die Sache aber bei der Suche nach dem aus, was letztendlich jede Geschichte braucht, nämlich einen Schuldigen.

Also, wo steht der „Feind“, in unserem speziellen Fall also der Auslöser oder Schuldige am Klimawandel? Je nach Motivation und zitierter Quelle ist der Auslöser der Erwärmung immer wieder ein anderer: Mal ist es die natürliche Variabilität des Klimas – denn schließlich veränderte sich das Klima des Planeten ja schon immer, auch in Zeiten ohne Menschen –, mal sind es astronomische Veränderungen etwa der Erdbahnparameter, dann ist es die Intensität der Sonneneinstrahlung, und – natürlich auch – mal der Mensch mit

seinem gigantischen Ausstoß an Treibhausgasen. „Werdet Euch doch bitte einmal einig“, mag man ausrufen. Sind etwa wir, die Menschheit, Schuld an dem momentanen Klimawandel? Und was soll also das ganze Geschrei und die angerichtete Verwirrung, wenn wir nicht einmal in der Lage sind, den Schuldigen zu benennen?

Jeder Zeitungs- und Internet-Blog-Leser kennt die hochemotionale, teilweise schon fast religiöse Züge annehmende Debatte um jede neue – oder manchmal auch nur scheinbar neue – wissenschaftliche Erkenntnis, die Aspekte des Klimawandels betrifft. Mit Erstaunen nimmt der Leser wahr, welche „Sau“ durchs mediale Dorf getrieben wird, sobald irgendjemand irgendeine neue Erkenntnis oder auch nur einen neuen Gedanken veröffentlicht – egal, um welche Erkenntnis es sich gerade dreht oder wie abstrus der jeweilige Gedanke bei näherer Betrachtung auch ist.

Eines der jüngsten Beispiele war gerade die aufgeregte Debatte um das Buch des RWE-Managers Fritz Vahrenholt, der den Schwankungen der Sonnenaktivität die Schuld am Klimawandel gibt und den Klimaforschern unterstellt, sie hätten die Veränderungen der Sonnenaktivität nicht in ihre Modelle einbezogen.

In meinen Augen ist das der ziemlich durchsichtige Versuch eines Lobbyisten der Energiewirtschaft, die Aussagen der Klimaforschung zu diskreditieren – wobei sich gerade beim zweiten Blick auf die Aussagen des Werks unwillkürlich die Frage stellt: Warum schreibt der Autor derartige Dinge, und was bezweckt er damit? Wollte er eine neue Kampagne der Energieerzeuger gegen die Existenz des Klimawandels starten und RWE-Methoden rechtfertigen? Wollte er mit ehemaligen Kollegen abrechnen und sie bloßstellen? Oder wollte er einfach nur provozieren und die Debatte um den Klimawandel am Laufen halten? Die Beantwortung dieser Fragen wäre umso interessanter, als dass Vahrenholt als Naturwissenschaftler eigentlich die Arbeits- und Funktionsweise des Wissenschaftsbetriebes kennen sollte.

Trotz aller Fehler wäre es aber zu kurz gegriffen, eine pauschale Medienschelte betreiben zu wollen oder den Bericht erstattenden Journalisten Unfähigkeit oder Ungenauigkeit in der Recherche vorzuwerfen. Auch die immer wieder vermutete „Gleichschaltung“ der „Lügenmedien“ ist genauso absurd wie die Behauptung, dass es eine weltumspannende Verschwörung der Klimaforscher gäbe. Fakt ist, dass die Journalistenkollegen mit dem Aufwand, den sie für die Hintergrundrecherche einer Geschichte betreiben, auf den hohen Zeitdruck und den wirtschaftlichen Druck reagieren und versuchen, Zeit einzusparen.

Hinzu kommt die Umsonst-Mentalität im Internet, deren Auswüchse gerade in der laufenden Debatte um das Urheberrecht zu beobachten sind. Aber auch das hat Gründe. Denn kaum startet der Computernutzer einen Webbrowser, taucht ungefragt Werbung auf, und er wird mit den verschiedensten Informationen regelrecht zugeschüttet. Von allen Seiten strömen die unterschiedlichsten Neuigkeiten auf den Leser ein, gelangen ohne sein Zutun zu ihm, nerven ihn – und sind ihm dementsprechend auch nichts mehr wert.

Schnell gewinnt gerade der Internetsurfer den Eindruck, dass er eh alle Informationen umsonst im Web bekommt, und wundert sich dann, wenn sich bei vielen Texten im Web

niemand mehr die Mühe gemacht hat, sie auf ihren Wahrheits- und Informationsgehalt hin abzuklopfen und sie entsprechend einzuordnen – und die Spreu vom Weizen zu trennen. Ohne hier per se eine Internetschelte betreiben zu wollen, bleibt unter dem Strich stehen, dass der „normale“ Leser – und Nicht-Experte – schon aufgrund der Informationsfülle kaum mehr zwischen schlichtem, aber gut verkauftem Unsinn und einer wirklichen Neuigkeit unterscheiden kann. Völlig überfordert sind die meisten spätestens dann, wenn es darum geht, die Relevanz der Neuigkeit abzuschätzen – kein Wunder bei den abertausenden Facetten unserer hochspezialisierten Welt.

Leidtragende dieser Entwicklung sind in erster Linie die Leser, die zu einem großen Teil kaum noch in der Lage sind, zwischen Werbung und einer „bahnbrechende Neuerung“, die sie oft von Firmen oder Interessenvertretungen – allerdings eben umsonst – vorgespielt bekommen, zu unterscheiden!

Leider nimmt der Verbraucher oder Leser diesen Zustand viel zu oft einfach hin, und es scheint ihm primär nicht auf Qualität, sondern auf Kostenersparnis anzukommen. Ein Phänomen, das in vielen Bereichen zu beobachten ist. Aber wie in vielen anderen Lebensbereichen gilt auch hier: Wenn alles möglichst umsonst oder möglichst billig sein soll, dann ist eben auch die Qualität meist dementsprechend. Das gilt etwa für die Qualität des Tierschutzes bei Discounter-„Biofleisch“ zu Niedrigpreisen aus vermeintlich tierfreundlicher Haltung ebenso wie für die Qualität von Texten im Internet.

Doch stopp! Nicht alles, was im Netz steht, ist per se schlecht! Es gibt auch viele gut gemachte Webseiten und Blogs von Wissenschaftlern, Universitäten und Forschungsinstituten, auf denen sich der interessierte Leser seriös und aus erster Hand über komplexe Themen informieren kann. Nur muss der Leser immer mehr selbst in die Rolle des recherchierenden Journalisten schlüpfen und ganz genau hinschauen, wer da über was schreibt und welcher Interessengemeinschaft der Autor angehört. Die Spreu vom Weizen zu trennen, ist – oder war – normalerweise eine der ersten Aufgaben für einen Journalisten und einer der ersten Schritte bei der Recherche. Die entscheidende Frage ist immer: Wem und welcher Information kann ich trauen?

Aber wie auch immer, mit diesem Buch will ich versuchen, tiefere Einblicke in die Grundlagen und Methoden der modernen Klimaforschung zu geben. Zu wichtig ist die Debatte um die Zukunft unseres Planeten und die Zukunft unserer Kinder, als dass man sie nur interessengesteuerten Menschen oder professionell arbeitenden Presseabteilungen überlassen sollte.

Im diesem Buch gehe ich auf die wichtigsten und gebräuchlichsten Quellen von Daten für die Klimaforschung ein. Was sind das für Daten, aus denen die Forscher die Zukunft unseres Planeten ablesen? Woher kommen sie und was sagen sie aus? Ein weiteres wichtiges Kapitel sind die Klimamodelle. Was ist überhaupt ein Modell und wie funktioniert es? Abschließend möchte ich ein paar Ableitungen und Maßnahmen vorstellen, die aus den Modellrechnungen folgen.

Mit all dem Wissen im Hinterkopf sollte es dem geneigten Leser leichter fallen, die Klimadebatte in Zukunft entspannter zu verfolgen und die vorgetragenen Argumente hinsichtlich ihrer Aussagekraft einordnen zu können – denn der nächste Sachstandsreport des

Weltklimarats IPCC und die nächste Weltklimakonferenz kommen bestimmt, und in ihrem Gefolge jede Menge neue Beiträge in den Medien.

Viel Spaß beim Lesen,  
Rüdiger Schacht

---

## Dank

Ohne mich hier in langen Dankesreden ergehen zu wollen, möchte ich mich bei ein paar Menschen namentlich bedanken, ohne die die Realisierung dieses Buches nicht möglich gewesen wäre. Da sind zunächst natürlich die „Chefkritiker“ in meiner Familie, ohne deren allumfassende Unterstützung die Arbeit an dem Buch unmöglich gewesen wäre. Danke für Euer aller Geduld, Rat und Tat und das Abwenden vieler kleiner und großer Katastrophen.

Mein weiterer Dank gilt meinen ehemaligen Kollegen am Kieler Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung (GEOMAR), die immer ein offenes Ohr für meine Fragen hatten und auch nicht mit konstruktiver Kritik sparten. Für die vielen Anregungen und fruchtbaren Diskussionen gilt mein Dank gerade Prof. Dr. Mojib Latif und Prof. Dr. Martin Visbeck. Nicht vergessen möchte ich hier aber auch den Pressesprecher des GEOMAR, Dr. Andreas Villwock, dem ich für die vielen kleinen und großen Hilfestellungen – etwa bei der Suche nach Ansprechpartnern und Abbildungen – herzlich danke.

Außerdem möchte ich mich bei allen in den Kapiteln erwähnten Wissenschaftlern bedanken, die mir bei der Einarbeitung in das jeweilige Thema sowie der Erstellung und Korrektur der Texte halfen. Nur mit ihrer Hilfe wurde es möglich, fachlich korrekt über die jeweilige Forschungsdisziplin zu berichten. Herzlichen Dank auch für die mir überlassenen Abbildungen und Fotos, die hier ihre Forschungsergebnisse illustrieren.

Herzlich danken möchte ich auch den Mitarbeitern des Deutschen Wetterdienstes (DWD), die stets ein offenes Ohr für Verständnisfragen und Bitten (etwa nach Abbildungen) hatten. Stellvertretend für alle Beteiligten seien hier der Vizepräsident des DWD, Dr. Paul Becker, der Pressesprecher des DWD, Gerhard Lux, und die Mitarbeiter des Seewetteramtes in Hamburg, Wolfgang Gloeden, Gudrun Rosenhagen und Dr. Birger Tinz genannt. Vielen Dank für ihr Interesse und ihre Mithilfe an dem Buch. Mein besonderer Dank für ihr Engagement und das Ebnen vieler Wege gilt Herrn Dr. Becker und Herrn Dr. Tinz.

Nicht vergessen möchte ich die beiden Lektorinnen Kerstin Hoffmann und Merlet Behncke-Braunbeck vom Springer Fachverlag, denen ich sehr für die Unterstützung und die Geduld danke. Ohne ihre Hilfe wäre zwischendurch einiges „schief“ gelaufen.

Abschließend meinen herzlichen Dank für ihr Interesse am Thema und die Langmut bei der Beantwortung von Nachfragen an alle hier ungenannten Kollegen aus der Forschung – wie etwa Prof. Dr. Hans v. Storch und Dr. Marco Giorgetta vom Max-Planck-Institut für

Meteorologie und dem Deutschen Klimarechenzentrum (DKRZ) sowie Prof. Dr. Martin Claussen vom Zentrum für Marine und Atmosphärische Wissenschaften (ZMAW) in Hamburg.

---

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Klimaforschung – was ist eigentlich?</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Grundlagen</b>	<b>5</b>
2.1	Wetter und Klima	5
2.2	Zum Unterschied zwischen Wettervorhersagen und Klimaprojektionen	9
2.2.1	Wettervorhersagen	9
2.2.2	Klimaprojektionen	10
2.3	Isotopenmessungen	12
2.3.1	Sauerstoff-Isotopenmessungen	13
2.3.2	Isotope des Kohlenstoffs	14
2.4	Isotopenthermometer	16
2.4.1	Das Sauerstoff-Isotopenthermometer	16
2.4.2	Das Edelgas-Isotopenthermometer	18
<b>3</b>	<b>Das Klima der Vergangenheit</b>	<b>21</b>
3.1	Meeressedimente	23
3.1.1	Meeresgeologie	26
3.2	Warven	33
3.3	Dendrochronologie	37
3.4	„Tropfsteine“ – Speläotheme	40
3.5	Eisbohrkerne	45
3.5.1	Luftbläschen als Klimaarchive	46
3.6	Vulkane und Meteoriteneinschläge	49
3.6.1	Vulkanismus	49
3.6.2	Meteoriteneinschläge	65
3.7	Permafrostböden	70
<b>4</b>	<b>Das Klima der Neuzeit</b>	<b>75</b>
4.1	Archäologische Hinweise auf Veränderungen des Klimas	80
4.1.1	Untergang der Harappa-Hochkultur	83
4.1.2	Untergang der Maya-Hochkultur	83

4.1.3	Klimawandel in der Steinzeit . . . . .	84
4.2	Historische Klimaaufzeichnungen beim Seewetteramt Hamburg . . . . .	87
4.3	Historische Klimaaufzeichnungen des Deutschen Wetterdienstes Offenbach . . . . .	93
4.4	Satellitendaten . . . . .	96
4.4.1	Klima-Monitoring von und mit Satelliten . . . . .	98
4.5	Daten von See . . . . .	100
4.5.1	Langzeitdaten von der Insel: die Biologische Anstalt Helgoland . . . . .	100
4.5.2	ARGO – Forschende Bojen in den Weltmeeren . . . . .	101
<b>5</b>	<b>Die Rolle des Ozeans</b> . . . . .	<b>109</b>
5.1	Meeresströmungen . . . . .	111
5.1.1	Thermohaline Zirkulation . . . . .	111
5.2	Trägheit des Systems . . . . .	113
5.3	Ozeanversauerung – „das andere CO <sub>2</sub> -Problem“ . . . . .	113
5.3.1	Gewinner der Versauerung . . . . .	119
5.4	Auswirkungen für das Klima der Zukunft? . . . . .	125
5.5	Meeresspiegel . . . . .	125
5.6	Dichteschichtung im Ozean . . . . .	127
5.7	Meereis . . . . .	129
<b>6</b>	<b>Klimamodelle und Klimakonferenzen</b> . . . . .	<b>137</b>
6.1	Klimamodelle . . . . .	137
6.1.1	Geschichtliches zu Klimamodellen . . . . .	138
6.1.2	Der Weg zu modernen Klimamodellen . . . . .	140
6.1.3	Klimaszenarien . . . . .	145
6.2	Klimakonferenzen . . . . .	148
<b>7</b>	<b>Klimaservices</b> . . . . .	<b>161</b>
7.1	Klimaservices des Deutschen Wetterdienstes . . . . .	162
7.2	Regionale Adaptionenpläne . . . . .	165
7.2.1	Eine Metropolregion im Klimawandel: Frankfurt am Main . . . . .	165
7.2.2	Anpassungsstrategien im Norden: die Metropolregion Hamburg . . . . .	169
7.2.3	Kontrastprogramm: Leben mit dem Fluss . . . . .	176
7.3	Küstenschutz an der deutschen Nord- und Ostseeküste . . . . .	178
7.4	Zivil- und Katastrophenschutz . . . . .	183
7.5	Geo- und Climate-Engineering als mögliche Lösungen des CO <sub>2</sub> -Problems? . . . . .	184

---

<b>8</b>	<b>Wann bekommen die Küstenbewohner denn nun nasse Füße?</b> .....	191
8.1	Zum Umgang mit Gefahren .....	191
8.2	Von der Erlebbarkeit des Klimawandels .....	197
8.3	Persönliches Fazit .....	198
<b>Nachwort</b>	.....	205
<b>Literatur</b>	.....	209
<b>Sachverzeichnis</b>	.....	211

Eine recht gute Definition von Klimaforschung findet sich auf der Webseite der Zeitschrift *Welt der Physik*:

Die Klimaforschung ist eine junge Wissenschaft: Erst im Laufe des 20. Jahrhunderts ist das durchschnittliche Verhalten der Atmosphäre enträtselt worden. (...) Denn zum Klimasystem im weiteren Sinne gehören neben der Atmosphäre auch der Ozean und das Eis von Gletschern und an den Polen.

Vielerlei Messgeräte an Land, Satelliten im All und Sonden im Meer registrieren die heutigen Klimabedingungen. Linienflugzeuge erbringen ebenfalls wichtige aktuelle Messdaten. Doch die Klimaforschung interessiert sich nicht allein für die Gegenwart: Wie das Klima früherer Jahrtausende und Jahrmillionen aussah, finden Paläoklimatologen anhand von Sedimenten, Baumringen (...) und Eisbohrkernen heraus.

An den physikalischen Mechanismen forschen die Theoretiker. Auf dieser Grundlage werden Klimamodelle für Computersimulationen entwickelt. Solche Simulationen verraten zusammen mit den paläoklimatologischen Befunden, was früher das Klima veränderte.

(...) Heutzutage übt auch die Menschheit einen Einfluss aus: Die Emission von Treibhausgasen führt dazu, dass mehr langwellige Abstrahlung von der Erde in der Atmosphäre gefangen bleibt und sich unser Planet erwärmt. Klimaszenarien per Computer für die kommenden Jahrzehnte sind darum ein wichtiges Forschungsgebiet. Doch Klimaforscher versuchen sich auch an kurzfristigeren Vorhersagen. Die nächste Jahreszeit scheint sich beispielsweise der Tendenz nach prognostizieren zu lassen.

Die Klimaforschung ist eine physikalische Disziplin mit vielen Berührungspunkten zu anderen Fachrichtungen: Ohne Luftchemie lassen sich etwa das Ozonloch oder die Bildung von Smog nicht verstehen. Und um zu begreifen, wie der Kohlenstoff im Klimasystem zirkuliert, müssen auch biologische Faktoren wie das Wachstum von Wäldern berücksichtigt werden.

Gut, das ist doch schon einmal eine ziemlich umfassende Definition, die bereits einen Ausblick auf die Inhalte der folgenden Seiten bietet.

Generalisierend lässt sich zum Klima bemerken, dass von ihm alles pflanzliche und tierische Leben auf unserem Planeten unmittelbar abhängig ist. Jeder kennt die verschiedenen Klimazonen der Erde und ihre typischen Bewohner, seien es Kamele, Eisbären oder Bergziegen. Über Anpassungsprozesse der Evolution entwickelten sich über die Jahrmilliarden

hochspezialisierte Arten, die sowohl die Eiswüsten der Arktis und Antarktis als auch die Sandwüsten der Sahara bevölkern und sowohl mit extremer Kälte als auch mit extremer Hitze und Trockenheit zurechtkommen.

Auf den naturwissenschaftlichen Forschungs- und Entdeckungsreisen des 19. und 20. Jahrhunderts fanden die frühen Forscher Hinterlassenschaften (Fossilien) dieser Lebewesen in den Gesteinen rund um den Globus, die zunächst in unlösbarem Widerspruch zur heutigen Umgebung standen. Lauter verwirrende Befunde, die mal auf eine andere Verteilung der Kontinente – und mal auf eine Veränderung des Klimas hindeuteten.

So fanden sich etwa in Gesteinen der heute vereisten und sturmuhtosten Alpengipfel Fossilien von Meerestieren, wie man sie heute aus tropischen Gewässern kennt – und die man zunächst nicht in Gebirgen mit mehreren tausend Metern Höhe erwarten würde. Die Landschaft und die Umwelt der heutigen Alpenregion haben sich also teilweise extrem verändert, und dort, wo heute Bergziegen die Gesteinsgrate erklimmen, plätscherten offenbar einmal die Wellen eines subtropischen Meeres, in dem etwa die Vorläufer der modernen Tintenfische lebten.

Diese Erkenntnisse elektrisierten die frühen Naturforscher, die sich auf die Suche nach einer Erklärung der merkwürdigen Befunde machten und zum Teil die abenteuerlichsten Theorien aufstellten – die sie immer wieder verwarfen, bis sich schließlich unser modernes Weltbild mit einer sich stetig verändernden Erdoberfläche und einem sich verändernden Klima entwickelte.

Stellvertretend für die vielen Entdeckungen der modernen Geowissenschaften sei hier die seinerzeit stark umstrittene Theorie der Plattentektonik erwähnt, die einen Quantensprung in den Geowissenschaften darstellt und unser Weltbild revolutionierte. Mit seiner 1912 veröffentlichten Theorie stieß der Meteorologe Alfred Wegener (1880–1930) die Geowissenschaftler seiner Zeit komplett vor den Kopf, weil er aus der starren Welt eine hochveränderliche machte. Andererseits erklärten die driftenden Kontinente aber eine Vielzahl der geologischen und paläontologischen Merkwürdigkeiten, die vor Wegener nur durch Hilfskonstruktionen, wie ominöse Landbrücken und Faunensprünge, einigermaßen plausibel erklärt wurden. Erlebte Wegener die geophysikalische Bestätigung seiner Theorie auch nicht mehr, so ist sie längst eine etablierte geologische Gewissheit und wird weltweit gelehrt – erklärt sie doch das Entstehen und Vergehen von Gebirgen und Ozeanen ebenso wie die heutige Verteilung der Kontinente und den Verlauf vieler Meeresströmungen.

Von entscheidender Wichtigkeit für die Bestätigung von Wegeners Theorie waren die geologischen und geophysikalischen Forschungskampagnen in den Ozeanen während der 1950er-Jahre. Sozusagen nebenbei wurden dabei die Wechselwirkungen zwischen der scheinbar starren Welt der Gesteine und dem Werden und Vergehen der Ozeane und Kontinente ersichtlich. Ein Nebeneffekt der damaligen Forschungen war die Entdeckung der Ablagerungen in den Ozeanbecken, aus der die künftigen Generationen von Meeresgeologen die Veränderungen des Klimas in der Vergangenheit rekonstruieren konnten.

Ließen schon die Funde von Fossilien an Land auf ein wechselvolles Klima schließen, so lieferten die Funde in den Ablagerungen der Tiefsee jetzt neue Beweise, die sich mit denen

an Land deckten. Also unterliegt nicht nur die Erde (oder genauer, deren Kruste) steter Veränderung, sondern auch das Klima unseres Planeten wandelte sich.

Wie wir in den folgenden Kapiteln sehen werden, stecken in vielen Zeugnissen der belebten und unbelebten Natur sowie in den Hinterlassenschaften des Menschen eine Menge Informationen, aus denen man auf die klimatischen Verhältnisse zu ihrer Lebens- und Bildungszeit schließen kann.

Auf der Suche nach einer allgemeinen Definition von Klimaforschung wird man zum Beispiel auf der Internetseite des Deutschen Klimarechenzentrums (DKRZ) in Hamburg fündig:

Klimaforschung ist in erster Linie Grundlagenforschung. Ziel ist es, die statistischen Eigenschaften des Wetters zu verstehen und über längere Zeiträume hinweg möglichst realitätsnah berechnen zu können. Im Gegensatz zur Wettervorhersage (...), bei der man umfangreiche Beobachtungsdaten als Startwerte benötigt, müssen für Langfristsimulationen des Klimas die Randbedingungen sowie auch die vielen Prozesse in – und Wechselwirkungen zwischen – der Atmosphäre, dem Ozean, dem Eis und dem Land berücksichtigt werden.

Um die Methoden der Klimaforschung besser verstehen zu können, möchte ich im nächsten Kapitel die Grundlagen für die Methoden darstellen. Sie bilden gewissermaßen das Gerüst für die Untersuchungen der Klimaforschung.

Ihr schneller Zugang zu weiteren Informationen:

- ▶ welt der physik



- ▶ Deutsches Klimarechenzentrum



Nachdem ich lange überlegt habe, wie und wo ich grundlegende Dinge, auf die ich immer wieder zurückkomme, platziere – wie etwa einen Überblick über die Anwendung und den Nutzen von Isotopenmessungen – habe ich mich schließlich doch für ein Kapitel „Grundlagen“ entschieden.

Mir ist durchaus bewusst, dass ein solches Kapitel seine Längen hat. Dennoch denke ich, es ist einfacher, zum Nachschlagen in ein separates Kapitel zurückzuspringen als kreuz und quer durch das Buch. Außerdem sind einige Themenkomplexe zu umfangreich, um sie als Einschübe im Text zu positionieren, der damit überfrachtet und unübersichtlich würde.

---

## 2.1 Wetter und Klima

Beginnen möchte ich mit der meines Erachtens vielleicht wichtigsten Grundlage – oder besser: Richtigstellung – in der ganzen Klimadebatte: dem scheinbar so trivialen Unterschied zwischen Wetter und Klima.

Man achte bitte auf die Formulierung „scheinbar“, denn auf der Verwechslung oder dem Gleichsetzen von Wetter und Klima und dem unpräzisen Umgang mit den beiden Begriffen beruht ein Großteil der Irritationen und Falschmeldungen in der Debatte um den Klimawandel während der letzten Jahre. So beziehen sich nämlich bei genauerem Hinsehen viele Argumente gegen die Erderwärmung eben nicht auf das Klima, sondern auf das momentan erlebbare, lokale Wetter, das dann fälschlicherweise mit dem Klima gleichgesetzt wird.

Ein gutes Beispiel für dieses Missverständnis ist etwa das oft vorgebrachte Scheinargument gegen die Existenz des Klimawandels, dass die Winter der letzten Jahre immer wieder neue Kälterekorde und zum Teil wochenlangen Schneefall brachten.

Und das veranschaulicht schon recht gut das Dilemma mit dem Klimawandel: Wie kann ein „normaler“ Mensch beim morgendlichen Schneeschippen an eine sich erwärmende Erde glauben? Und leider bedienen – und bedienen – auch viele Medien in „schöner“

Regelmäßigkeit dieses Missverständnis. So wunderte es nicht, das gerade während des kalten Winters 2010/2011 immer wieder Geschichten durch die Presse geisterten, in denen eher vor einer möglicherweise bevorstehenden neuen Eiszeit als vor den Gefahren durch den Klimawandel gewarnt wurde. So stellten sogar einige Qualitätsmedien ernsthaft die Frage: „Es wird immer kälter – erleben wir gerade den Beginn einer neuen Eiszeit?“

Tja, wie kann es sein, dass wir morgens vor unserer Haustür Schnee schippen müssen, wenn sich doch die Erde erwärmt? „Die Diskrepanz zwischen dem, was wir jeden Tag erleben, und dem, was die Klimatologen betrachten, liegt in dem Unterschied zwischen dem Wetter und dem Klima begründet“, erklärt Prof. Dr. Mojib Latif und ergänzt schmunzelnd: „Klima ist das, was wir erwarten, Wetter ist das, was wir bekommen.“

Hm, „schöner Spruch“, mag man denken – aber was meint der Wissenschaftler damit? Im Gegensatz zum Klima ist das tägliche Wetter ein Produkt der kurzlebigen, chaotischen Prozesse in der Atmosphäre, und die Wettervorhersage befasst sich mit dem Verlauf einzelner, räumlich begrenzter Prozesse, wie etwa einem Tiefdruckgebiet, das vom Atlantik her über die Nordsee nach Deutschland zieht – und prognostiziert deren Entwicklung für einige Tage. „Das Klima hingegen wird über die statistische Mittelung meteorologischer Parameter wie etwa der Lufttemperatur oder des Niederschlags definiert und aus langen Zeitreihen der Wetterbeobachtung abgeleitet“, ergänzt Latif.

Aha, und was heißt das?

Bei der Wettervorhersage projizieren die Meteorologen des Deutschen Wetterdienstes (DWD) die aktuellen Verhältnisse der Atmosphäre in die nahe Zukunft. Dazu messen sie die aktuellen physikalischen Parameter im unteren Stockwerk der Atmosphäre, der sogenannten Troposphäre, zeichnen sie auf und beobachten ihre kurzzeitigen Veränderungen. Bei der „Vorhersage“ des Wetters werden die weltweit erhobenen Messungen in die auf den physikalischen Grundgesetzen fußenden Computermodelle eingegeben und die weitere Entwicklung für einige Tage im Voraus berechnet. Das funktioniert bei einer Vielzahl von Messwerten so gut, um etwa vor zu erwartenden Extremereignissen wie Starkregen zu warnen. „Allerdings“, so Latif, „gibt es wegen der chaotischen Natur des Wetters eine theoretische Grenze für die Wettervorhersage, die im Mittel bei etwa zwei Wochen liegt. Diese werden wir niemals entscheidend verlängern können, egal wie gut die Messungen oder die Modelle werden.“

„Im Gegensatz zur Wettervorhersage befasst sich die Klimaforschung aber eben nicht mit kurzzeitigen Einzelereignissen“, führt Latif weiter aus. „Die Klimaforschung ist an den Mittelwerten, wie etwa der Tagesmitteltemperatur, über einen langen Zeitraum hinweg interessiert – und an ihren langfristigen Trends.“

Für die Klimaforschung nutzen die Wissenschaftler eine wenigstens 30 Jahre umfassende Beobachtungsreihe etwa der Tagesdurchschnittstemperatur oder der mittleren Niederschlagsmenge. Entsprechend einer internationalen Übereinkunft der World Meteorological Organisation (WMO) definiert man das Klima einer Region standardisiert anhand gemittelter meteorologischer Kenngrößen wie Luftdruck, Temperatur und Niederschlag über einen Zeitraum von 30 Jahren. Viele Daten werden ja ohnehin täglich im sechsstündigen Rhythmus für die Wettervorhersage erhoben.

Ein wichtiger – und gewollter! – Effekt der Mittelwertbildung ist, dass kurzzeitige Abweichungen und lokale Wetterextreme aus der langzeitlichen „klimatologischen“ Betrachtung herausfallen und sich so ein konsistentes Bild für das Klima einer Region abzeichnet.

Und wie ist das mit Extremereignissen?

„Zur Berechnung des Klimas zählt auch die Angabe der Wahrscheinlichkeit des Auftretens für Wetterextreme. Wenn man nun etwa wissen will, inwieweit bestimmte Wetterereignisse, wie zum Beispiel die für hiesige Verhältnisse strenge Kälte während des Winters 2010/2011, wirklich außergewöhnlich war, vergleicht man sie mit denen der gesamten 30-Jahresperiode“, erklärt Latif. Dann lässt sich schnell abschätzen, ob das betrachtete Wetterphänomen tatsächlich außergewöhnlich war oder sich in der normalen Variationsbreite des Klimas bewegt. „Da das für alle Wetterphänomene gilt, relativieren sich scheinbare Extremereignisse meist sehr schnell, und die eisigen Temperaturen des Winters 2010/2011, die einige Journalisten schon die neue Eiszeit ausrufen ließen, bewegen sich in der normalen Variationsbreite des hiesigen Klimas“, ordnet Latif ein. „Kurzzeitige – auch extrem anmutende – Schwankungen um den Mittelwert der 30-Jahresperiode sind sehr oft der chaotischen Natur des Wetters geschuldet und nicht unbedingt Ausdruck eines sich ändernden Klimas! Und das gilt auch für die globale Erwärmung. Nicht jedes Wetterextrem hat etwas mit uns Menschen zu tun.“

Ein Zweck der Einführung der 30-Jahresperiode durch die Weltorganisation für Meteorologie war, auf dieser Ebene eine größtmögliche Vergleichbarkeit der gemittelten Messergebnisse weltweit zu erreichen und quasi ein „mittleres (oder durchschnittliches) Wetter“ für eine bestimmte Region zu definieren. Heute ist das 30-Jahresintervall der weltweit geltende Standard für Klimabeobachtungen. „Über den Vergleich zweier 30-Jahresintervalle lassen sich dann Rückschlüsse auf eine mögliche Klimaänderung ziehen“, ergänzt Latif.

Definition StartAnzumerken ist, dass angesichts der Dynamik des Klimawandels einige Forschergruppen das 30-Jahresintervall für ihre speziellen Fragestellungen als zu lang ansehen. Sie definieren stattdessen Zeitreihen von beispielsweise nur fünf oder zehn Jahren. Mögen diese Zeiträume für die jeweiligen Studien und Betrachtungen relevant sein, international verbindlich sind sie nicht. Es gilt die Definition der WMO!

### **Wetter und Klima sind zweierlei**

Wetter und Klima sind zwei verschiedene Dinge: Bei dem Wetter handelt es sich um die kurzzeitigen, chaotischen Abläufe in der Atmosphäre. Das Klima hingegen ist eine statistische Größe, die sich auf die arithmetische Mittelung der Messwerte einer wenigstens 30 Jahre langen Periode bezieht.

Betrachtet man derartige Intervalle, liegt natürlich die Frage nahe, wie es mit der Dynamik des Klimas, also dessen Veränderlichkeit über die Zeit aussieht.

„Zum Verständnis der Klimadynamik, also der Prozesse, die den mittleren Zustand und die Variabilität der Atmosphäre über längere Zeiträume bestimmen, reicht die herkömmliche Definition von Klima nicht aus, denn die längerfristigen

Veränderungen der Atmosphäre werden wesentlich durch die Wechselwirkung der Atmosphäre mit dem Ozean, der Vegetation und den Eismassen geprägt“, erläutert Prof. Dr. Martin Claussen, Direktor des Max-Planck-Instituts für Meteorologie (MPI-M) in Hamburg. „Aus diesem Grunde wird in der Klimadynamik das Klima über den Zustand und das statistische Verhalten des Klimasystems definiert.“

Zugegeben, das ist schon eine ebenso umfassende wie sperrige Beschreibung der beteiligten Prozesse. Aber es geht auch einfacher: So ist im *Handbuch der Klimatologie* von Julius von Hann aus dem Jahr 1908 zu lesen: „(...) unter Klima verstehen wir die Gesamtheit der meteorologischen Erscheinungen, welche den mittleren Zustand der Atmosphäre an irgendeiner Stelle der Erdoberfläche charakterisieren. (...)“

Der Weltklimarat IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) definiert auf seiner Website Klima wie folgt:

Das Klima ist ein komplexes, interaktives System, das aus der Atmosphäre, der Landoberfläche, Schnee und Eis, Ozeanen und anderen Gewässern sowie Lebewesen besteht. Die atmosphärische Komponente des Klimasystems charakterisiert das Klima am offenkundigsten. (...)

Klima wird (... daher ...) oft als „durchschnittliches Wetter“ definiert (... und ...) als Durchschnitt und Variabilität von Temperatur, Niederschlag und Wind über einen längeren Zeitraum, der sich über Monate bis hin zu Millionen von Jahren erstrecken kann, (...) beschrieben.

Zur Beantwortung ihrer Fragen benötigen die Klimaforscher also lange Reihen von Messwerten, die wenigstens einen Zeitraum von 30 Jahren abdecken. Aber wie gelangt man überhaupt an Daten aus so langen Zeiträumen?

Da sind zunächst natürlich die menschlichen Wetteraufzeichnungen zu nennen, die in Deutschland bis in das frühe 18. Jahrhundert zurückreichen und in den Archiven des Deutschen Wetterdienstes (DWD) in Offenbach und dem Hamburger Seewetteramt, einer Außenstelle des Deutschen Wetterdienstes, lagern (vgl. Kap. 4). Sie bilden eine wichtige Grundlage für Rekonstruktionen und Vergleiche des aktuellen Zustands der Atmosphäre und des Ozeans in der jüngsten Zeit.

Dramatische Klimaänderungen auf unserem Planeten ereigneten sich aber auch schon vor dieser Zeit, und jedes Schulkind weiß, dass es hier in Deutschland auch einmal Eiszeiten gab, in denen die Gletscher sich von Skandinavien bis an die Mittelgebirge ausbreiteten. An die Eiszeiten schließt sich die jüngste Epoche der Erdgeschichte an, in der wir heute leben: das Holozän. Nach den Eiszeiten schmolzen die Gletscher wieder ab, und der Meeresspiegel stieg beträchtlich an. Doch dazu später mehr.

In Anbetracht dieser Erkenntnis liegt es für die Klimaforscher natürlich nahe, nach Möglichkeit die klimatische Entwicklung von den Eiszeiten bis heute zu untersuchen und zu schauen, warum sich das Klima geändert hat. Als wichtige Parameter für Klimaänderun-

gen sind etwa Veränderungen der globalen Mitteltemperatur und der Zusammensetzung der Luft zu nennen.

Doch wie gelangen die Forscher an derartige Paläoklimawerte? Wie und woraus lässt sich das Klima aus grauer Vorzeit rekonstruieren? Auf diese Fragen gehen die verschiedenen Abschnitte im Kap. 3 ein.

### **Klimaänderungen über die Zeit**

Im Gegensatz zu kurzzeitigen, aktuellen Wettervorhersagen beruhen die Aussagen der Klimaforschung auf langfristigen und gemittelten Wetterdaten, aus denen die Wissenschaftler Trends ableiten und diese auch mit Hilfe physikalischer Modelle in die Zukunft projizieren können. Eben diese Trends finden sich in den Projektionen des Weltklimarats für die Entwicklung des Klimas der Zukunft.

---

## **2.2 Zum Unterschied zwischen Wettervorhersagen und Klimaprojektionen**

Nachdem wir den Unterschied zwischen Wetter und Klima geklärt haben, kommen wir nun zu einer Frage, die viele Menschen immer wieder ungläubig schauen lässt: Wie gelingt es den Meteorologen, mit recht hohen Genauigkeit das Wetter für bis zu zwei Wochen vorherzusagen, und wie können Klimaforscher das Klima in hundert Jahren prognostizieren?

Wie oben bereits ausgeführt, nutzt die Wettervorhersage die aktuellen Messergebnisse der physikalischen Parameter der sich aktuell in der Atmosphäre abspielenden Prozesse und verfolgt deren kurzfristige Veränderlichkeit über die Zeit. Dass das Ganze umso besser funktioniert, je besser die Datengrundlage ist – also desto genauer wird, je mehr Daten zur Verfügung stehen –, liegt auf der Hand.

### **2.2.1 Wettervorhersagen**

„Wetterprognosen sind im mathematischen Sinne ein Anfangsproblem“, erläutert Prof. Dr. Mojib Latif. Die Vorhersagemöglichkeit des Wetters resultiert folglich aus den Startwerten, also den an den Stationen abgelesenen Messwerten. In einem chaotischen System, wie der Atmosphäre, wachsen aber selbst sehr kleine Rundungs- und Messfehler schnell an und vermindern die Qualität der Vorhersage innerhalb weniger Tage. „Hinzu kommt, dass wir für eine ‚perfekte‘ Vorhersage exakte Messwerte von der ganzen Welt bräuchten, die dann als Anfangswerte in die Modelle zur Vorhersage einfließen würden – dass sich dieser Anspruch nicht realisieren lässt, liegt auf der Hand“, ergänzt Latif.

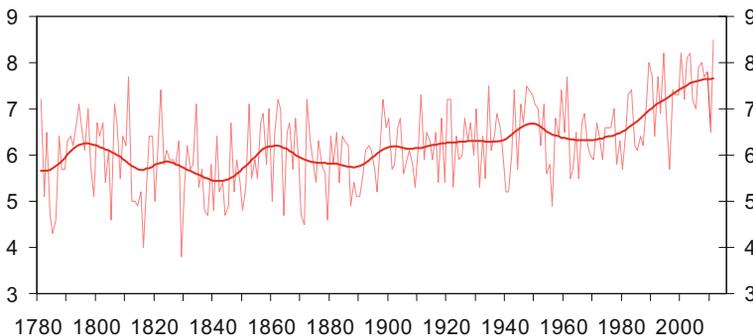
Nun gut, aber wie machen es die Profis?

„Über unser zum großen Teil automatisiertes Stationsnetz bekommen wir permanent Meldungen über die physikalischen Parameter Temperatur, Feuchte, Windgeschwindigkeit und Niederschlag gemeldet“, erläutert der Vizepräsident des Deutschen Wetterdienstes (DWD) Dr. Paul Becker. So lässt sich etwa über die Veränderung des Luftdrucks und der Windgeschwindigkeit an den Stationen entlang einer West-Ost-Strecke der Verlauf eines Tiefdruckgebietes, das von der Nordsee nach Deutschland hineinzieht, anhand der Veränderungen der physikalischen Parameter lokal genau nachvollziehen. Bei der Vorhersage der weiteren Wetterentwicklung schauen die Meteorologen dann auf die Windrichtung, das Wetterradar und den Satellitenfilm und projizieren den Verlauf des Tiefs in die nahe Zukunft.

### 2.2.2 Klimaprojektionen

„Bei den Projektionen des zukünftigen Erdklimas stützen sich die Wissenschaftler auf die Daten des Wetters aus der Vergangenheit (Abschn. 2.1) und projizieren sie mit den Klimamodellen unter verschiedenen Annahmen, etwa für den zu erwartenden Treibhausgasausstoß, in die Zukunft“, sagt Mojib Latif. „Denn bei den Projektionen geht es in erster Linie um die langfristigen Trends, wie etwa um die Erhöhung der Temperatur oder des Meeresspiegels während dieses Jahrhunderts, und nicht um die kurzfristige Entwicklung für das nächste oder übernächste Jahr – was jedoch immer wieder von der Öffentlichkeit und der Politik unter Projektionen verstanden wird.“

Bei den Annahmen, die in die Projektionen eingehen, stützen sich die Forscher auf die Beobachtungen aus der Vergangenheit. „Die Vergangenheit liefert uns schließlich mögliche Entwicklungen für den zu erwartenden Treibhausgasausstoß, mit denen wir dann die Computer der Klimarechenzentren füttern“, erläutert Latif. So kommen die Szenarien des IPCC zustande. „Mal steigt der CO<sub>2</sub>-Gehalt der Luft immer weiter an, mal beginnt er nach einiger Zeit wieder zu sinken, mal stagniert er nach ein paar Jahrzehnten“, erklärt Latif.



**Abb. 2.1** Entwicklung der Jahresmitteltemperatur am Hohenpeißenberg von 1781 bis 2011. Y-Achse: Temperatur in Grad Celsius, X-Achse: Zeit in Zehnjahres-Schritten (Quelle: Meteorologisches Observatorium Hohenpeißenberg, © Deutscher Wetterdienst)