

AUS POLITIK UND ZEITGESCHICHTE

Wetter

Jörg Kachelmann
VOM WISSEN
UM DAS NICHTWISSEN

Linda Richter
EINE GESCHICHTE
DES WETTERWISSENS

*Florian Pappenberger ·
Hannah L. Cloke*
ZUM STAND DER TECHNIK
IN DER WETTERVORHERSAGE

Kai Kornhuber
WIE DER KLIMAWANDEL
UNSER WETTER DER ZUKUNFT
BEEINFLUSST

Simone Sandholz · Dominic Sett
GESELLSCHAFTLICHER
UMGANG
MIT WETTEREXTREMEN

APuZ

ZEITSCHRIFT DER BUNDESZENTRALE
FÜR POLITISCHE BILDUNG

Beilage zur Wochenzeitung Das **Parlament**

Wetter

APuZ 52/2019

JÖRG KACHELMANN

VOM WISSEN UM DAS NICHTWISSEN.
DIE METEOROLOGIE IM SPANNUNGSFELD
ZWISCHEN LEGENDEN UND
NATURWISSENSCHAFT

Die Meteorologie ist im stetigen Wandel, die Messformen sind komplex und teils inkonsistent. Werden diese Unsicherheiten ignoriert, verfestigen sich schnell Legenden. Man sollte sich daher den Wert der Naturwissenschaften in Erinnerung rufen.

Seite 04–09

LINDA RICHTER

EINE GESCHICHTE DES WETTERWISSENS
Die Dominanz der Physik in der Meteorologie ist nicht selbstverständlich, sondern Ergebnis eines historischen Prozesses. Bis Mitte des 19. Jahrhunderts konkurrierten Wissensformen mit unterschiedlichen Vorstellungen von der Beobachtung und Prognose des Wetters miteinander.

Seite 10–15

FLORIAN PAPPENBERGER · HANNAH L. CLOKE
ZUM STAND DER TECHNIK IN DER
WETTERVORHERSAGE

Durch globale Vernetzung und die Zunahme von Satellitendaten hat sich die Wetterprognose in den vergangenen Jahren deutlich verbessert. Bei der weiteren Entwicklung wird viel davon abhängen, ob mit der Vielzahl der gesammelten Daten auch die Rechenleistung wächst.

Seite 16–21

KAI KORNUBER

WETTER IM WANDEL.
WIE DER KLIMAWANDEL UNSER WETTER
DER ZUKUNFT BEEINFLUSST

Klima, Wetter und menschliches Verhalten sind untrennbar miteinander verbunden. Wie sehr diese Verbindung nicht nur unseren Alltag beeinflusst, sondern auch prägend für unsere Zukunft sein kann, wird besonders durch die Zunahme von Wetterextremen deutlich.

Seite 22–29

SIMONE SANDHOLZ · DOMINIC SETT
GESELLSCHAFTLICHER UMGANG MIT
WETTEREXTREMEN. RISIKO, MANAGEMENT
UND ANPASSUNG

Wetterextreme können erhebliche negative Einflüsse haben, insbesondere für verwundbare und exponierte Personen oder Gruppen. Bei der Frage, wie ihnen begegnet werden kann, sind Städte durch ihre hohe Bevölkerungs- und Bebauungsdichte besonders bedeutend.

Seite 30–37

EDITORIAL

„Alle reden vom Wetter. Wir nicht“, plakatierte die Deutsche Bundesbahn Mitte der 1960er Jahre und warb so für ihr Image als witterungsunabhängiges Verkehrsmittel. In dem vielfach kopierten und persiflierten Slogan findet sich vieles, was gemeinhin mit „Wetter“ verbunden wird: Wetter als unmittelbar erlebbarer Zustand der Atmosphäre gilt als beliebtes und unverfängliches Gesprächsthema, zugleich möchte man den Alltag möglichst unbeeinträchtigt von Wetterbedingungen gestalten und planen können. Um Lebensweisheiten wie „Es gibt kein schlechtes Wetter, nur schlechte Kleidung!“ anwendbar zu machen, ist es daher vorteilhaft, heute schon zu wissen, wann und wo übermorgen eine Regenjacke nützlich sein könnte.

Wettervorhersagen sind heutzutage deutlich präziser als früher, was insbesondere der Zunahme von Satellitendaten und der globalen Vernetzung von meteorologischen Messungen und Prognosemodellen zu verdanken ist. Versuche, die Kausalitäten des Wetters zu verstehen und für Prognosen zu nutzen, lassen sich sehr weit zurückverfolgen. Bereits in Aristoteles' „Meteorologica“ wurde das Wetterwissen in ein sprachliches Fundament gegossen. Dass dieses heute von der Physik dominiert wird, ist das Ergebnis eines historischen Prozesses, der in Europa ab Mitte des 19. Jahrhunderts zur Bündelung der Wettermessungen in staatlichen Institutionen führte.

Für die Beantwortung der Frage, welche Auswirkungen der voranschreitende Klimawandel auf das künftige Wetter haben kann, ist jedoch nicht nur die Sammlung von Messdaten von zentraler Bedeutung, sondern auch die Vergleichbarkeit der Messbedingungen. In der Vergangenheit erstellte Modelle, die eine Zunahme von Wetterextremen prognostizierten, sind weitgehend eingetroffen. Bei Überlegungen, wie mit den Folgen umgegangen werden kann, gewinnen Fragen nach sozialen Strukturen, politischer Teilhabe und subjektiven Wahrnehmungen des individuellen Risikos an Relevanz. Insbesondere Städte als verdichtete Räume menschlichen Lebens rücken dabei in den Fokus. Klima, Wetter und menschliches Verhalten sind und bleiben so untrennbar miteinander verbunden.

Frederik Schetter

ESSAY

VOM WISSEN UM DAS NICHTWISSEN

Die Meteorologie im Spannungsfeld zwischen
Legenden und Naturwissenschaft*Jörg Kachelmann*

Mist, Quecksilberkügelchen auf dem 1970er-Jahre-Perserteppich. Was tun? Ich wusste, dass die Entsorgung ins Klo wohl nicht helfen würde bei den schweren Dingen und womöglich den ganzen Rhein zu Umkippen brächte, falls die Kläranlage das nicht packt. Also in den Staubsauger, da sieht es auch niemand, und ich war gerade allein zu Hause. Der Staubsauger aus den 1960ern hatte vorne ein Metallrohr und veränderte bemerkenswert sein Aussehen. Irgendetwas Metallisches außenrum blätterte ab und komplizierte das Unterfangen, die Kügelchen aufzusaugen. Am Ende war alles im Staubsaugerbeutel, das Gerät sah ganz anders aus, und mir wurde als 13-Jähriger nochmal bewusst, dass ich mit meinen Barometern und Thermometern vorsichtiger sein musste.

Im 17. Jahrhundert entdeckte der italienische Physiker Evangelista Torricelli, dass sich Quecksilber je nach Temperatur ausdehnt und dass man es auch für die Herstellung von Barometern verwenden kann. Rund 370 Jahre später hat sich am Prinzip nichts geändert, meine Quecksilber-Barometer und die ebensolchen Thermometer in der Wetterhütte funktionieren nach dem alten Prinzip von damals. Das ist sehr wichtig, weil wir heute bei der Beurteilung des Klimawandels darauf angewiesen sind, dass die Werte von früher mit den heutigen vergleichbar sind – was von den Instrumenten her der Fall ist, zugleich aber die Frage im Raum steht, wie das mit dem Strahlungsschutz gelöst wird, die Thermometer dürfen ja nicht in der Sonne hängen. Davon später mehr.

Bei der Luftfeuchtigkeit war es einfacher. Schon früh hatten Menschen (und das wahrscheinlich schon immer) entdeckt, dass sich Haare je nach Luftfeuchtigkeit verändern. Das begründete den Siegeszug des Haarhygrometers, das in den modernen Zeiten nur langsam durch elektronische Messverfahren abgelöst wird. Entscheidend

war dabei herauszufinden, welche Haare sich bei Feuchtigkeitsänderung am linearsten verhalten, damit man keine seltsamen logarithmischen Skalen applizieren muss. Das Ergebnis war: Menschenhaare funktionieren besser als Tierhaare, Frauenhaare besser als Männerhaare und blonde Haare besser als braune – was vielen Friseuren weltweit einen kleinen Nebenerwerb ermöglichte, wenn sich blonde Frauen plötzlich zu einem Kurzhaarschnitt entschieden.

WIND UND SONNE

Die Messung der Windgeschwindigkeit sowie der Sonnenscheindauer haben sich im Laufe der Zeit am stärksten entwickelt. Zu Anfang wurden die Windgeschwindigkeiten einfach aufgrund der Auswirkungen auf die Natur („Blätter säuseln“) geschätzt. Später wurden Metallplättchen drehbar auf eine Achse gebracht und über eine Windfahne so in den Wind gedreht, dass die Platte je nach Windstärke seitlich ausgelenkt wurde und über eine grobe Skala eine erste Fernablesung eines Geräts ermöglichte („Wildsche Windfahne“).

Danach kamen die Schalenkreuz-Anemometer, die sich bei mehr Wind immer schneller drehen und Windgeschwindigkeit für die meteorologische Praxis fernablesbar machten – der Dynamo erzeugte Strom, und auf Bergwetterwarten konnte man in der warmen Stube ablesen, wie sehr es draußen kachelte. Damit kommen wir aber zum größten Problem der Schalenkreuz-Windmesser: Man kann zwar den Dynamoschaft heizen, aber die dünnen Drehlöffel laden zur Ablagerung von Schnee und Eis ein. Die alten Windmesser auf dem Brocken, Fichtel- und Feldberg hatten entsprechend oft Dellen, wenn sie der Beobachter mit der Spitzhacke oder Schaufel beim Freimachen des Anemometers nicht optimal erwischte

hatte. Hier müssen wir auch eine Ausnahme machen bezüglich der Konsistenz alter Klimareihen: Im Winter und insbesondere auf den Bergen waren früher die durchschnittlichen Windgeschwindigkeiten zu gering, weil durch Schnee und Eis langsame(re) Drehphasen und Phasen des Stillstandes nicht zu vermeiden waren. Heute werden viele Windmesser nicht mehr als solche erkannt, weil sie wie eine Gartenkralle aussehen. Ultraschall misst die Bewegung der Luft, und weil sich am Windmesser selbst nichts mehr bewegt, kann man die Dinger auch beliebig hochheizen und sie so eisfrei halten – bei Sturm und minus 20 Grad Celsius mit ein paar Hundert Watt.

Bei der Sonnenscheindauer ist die alte Methode, in der eine Glaskugel das Sonnenlicht bündelt und in einen Pappstreifen brennt, noch nicht überall vollständig abgelöst worden. Heute nimmt man Geräte, die den Schatten eines Bügels im Gerät auswerten: Ist einer da, scheint die Sonne – ohne Schatten, keine Sonne. Die Glaskugel-Methode hat den Nachteil, dass sie durch Menschen ausgewertet wird – so kam beispielsweise Usedom zur falschen Annahme, die Insel sei der sonnigste Fleck Deutschlands. Das ist völliger Unsinn und beruht darauf, dass vor Jahrzehnten ein rühriger und lokalpatriotischer Mitarbeiter des Meteorologischen Dienstes der DDR auch den fernsten Hauch einer Verfärbung des Pappstreifens vorschriftswidrig als real existierende Sonnenscheindauer gewertet hat. Das hat er zwar nur sehr kurz gemacht, aber so kam ein Jahr zustande, in dem es in Deutschland angeblich nirgendwo sonniger war als auf Usedom. Dieses Jahr der Falschbewertung wurde dann schlicht auf ein „gilt immer“ hochgerechnet, und Usedom hat bis heute etwas, was sich auf Prospekte drucken lässt.

Immerhin ist Usedom realistischer in seinem Anspruch als viele andere Orte im Land, die von sich behaupten, dass sie die sonnigsten weit und breit seien. Dutzende Destinationen nehmen das für sich ohne wissenschaftliche Basis in Anspruch („se non è vero, è ben trovato“), fast alle zu Unrecht. Wenn das jemand für sich in Anspruch nehmen darf, sind es die Insel Hiddensee und der Norden von Rügen, beides in der Ostsee gelegen. Die Erklärung ist einfach: Erstens muss der sonnigste Ort eher östlich liegen, da nicht alle Tiefs aus Westen bis dorthin durchkommen, zweitens muss der fragliche Ort sehr maritim, also im besten Fall eine Insel sein. Im Mai und Juni, wenn das Festland schon warm ist und Quellwolken über sich hat, ist

das Ostseewasser noch kalt und unterdrückt so die Cumulusbildung – und genau dann sind auch die Tage besonders lang, sodass man mit den 16-Sonnenstunden-Tagen im Juni die verlorenen Binnenland-Seelen besonders nachhaltig abhängen kann.

REGEN UND SCHNEE

Kommen wir zum Niederschlag, von dem alle denken, dass es doch ganz einfach sei – Eimer rausstellen, Durchmesser oben wie Durchmesser unten (also zylindrisch), fertig. Dann einfach die Höhe der Wasseroberfläche vom Boden messen, und schon hat man die Regenmenge in Millimetern oder Litern pro Quadratmeter Boden. Aber: Es ist nicht so einfach, wie Sie denken. Zum einen gibt es das Problem, dass es bei uns auch schneit. Früher, als nur von Hand gemessen wurde, war es so: Jeder Wetterbeobachter hatte zwei Niederschlagsmesser. Hat es geschneit, wurde der eine reingenommen, um die Verdunstung zu verhindern mit einem Deckel bedeckt und das Tauwasser am Ende gemessen, während der frische Zweitniederschlagsmesser draußen seinen Dienst tat. Das ist ein etwas anstrengender Vorgang, auf den manche Wetterdienste verzichten – in Kanada beispielsweise wird nicht geschmolzen, sondern einfach angenommen, dass ein Zentimeter einem Millimeter Niederschlag entspricht. Das kann für nassen Schnee hinkommen, nicht aber für fluffigen Kanada-Schnee, der bei minus 20 Grad fällt – dann braucht es gut und gerne fünf Zentimeter, um einen Millimeter Wasser zu ergeben.

So wird der Jahresniederschlag an kanadischen Stationen ohne Niederschlagsmesser-Heizung systematisch überschätzt – die Heizung des Auffangimers ist eine Möglichkeit, um der Realität näher zu kommen, aber auch sie macht Probleme: Der Auffangtrichter muss laufend über null Grad, bei starkem Schneefall oder strengem Frost auch deutlich darüber temperiert sein, damit Schneeflocken schmelzen und direkt gemessen werden können. Das führt nun wieder dazu, dass leichtes Nieseln bei drei Grad oder Schneegrieseln bei Frost gar nie gemessen wird, sondern direkt an der warmen Unterlage verdunstet – eine systematische Unterschätzung des Niederschlags ist die Folge.

Das ist nun ein Problem, wenn wir heutige Niederschlagsmessungen mit jenen aus früheren Jahrzehnten vergleichen wollen, hier fällt uns die Automatisierung auf die Füße. Wenn Beobachterpersonal auf Berggipfeln abgezogen wird, hat das



Der Autor beim Bedienen einer nach dem Konstrukteur Thomas Stevenson benannten Wetterhütte („Stevenson Screen“).
© Jörg Kachelmann

oft den Verlust von jahrzehntelangen Messreihen zur Folge. Die Wetterbeobachter haben meist eine Batterie von Niederschlagsmessern aufgestellt und dann den genommen, der am meisten gemessen hat, denn Niederschlagsmessungen in den Bergen (und in den Prärien des Mittleren Westens) haben ein weiteres, großes Problem: Bei einem Schneesturm fällt meist absolut nichts in den Eimer, fast alles weht darüber hinweg. Es gibt zwar trichterartige Apparaturen, die in der horizontalen Luftströmung eine Abwärtskomponente herstellen sollen, aber viel können die nicht ausrichten. Oft messen die Automaten auf einem Berg nur noch ein Drittel der früher per Hand festgestellten Niederschlagsmengen – viele Wetterdienste geben dann gleich ganz auf.

Dadurch ist auch die Schneehöhenmessung nicht mehr das, was sie mal war. Schlurfte früher ein Beobachter durch die Schneewehen und steckte zehn Mal den Zollstock Richtung Boden und mittelte am Schluss das Ganze, entscheidet an windigen Orten heute Frau Holle-Zufall über

die gemessene Schneehöhe – unabhängig davon, ob an der einen, entscheidenden Messstelle gerade der Schnee weg- oder hingeweht wurde.

TEMPERATUR

Sie sehen, dass es kompliziert ist. Entsprechend schwierig ist es, ganz sicher zu ermitteln, wenn sich im Laufe der Jahrzehnte etwas verändert. Bei der Temperatur sehen wir den Klimawandel am weitaus deutlichsten und sichersten, auch wenn sich da einiges verändert hat. Früher wurde durchweg in sogenannten Wetterhütten gemessen, die Sonne und indirekte Strahlung aussperren sollen und in Nordamerika 1,5, sonst 2 Meter über „natürlichem Untergrund“ stehen (*Abbildung*) – was in unseren Breiten bei Flachlandstationen einer Wiese gleichkommt, die kein Fußballplatz, aber viel größer als eine Blumenrabatte sein muss.

Früher nahm man es bei uns mit den Standorten nicht so genau, was zu legendären Fehlein-

schätzungen führte wie im Falle der „Sonneninsel“ Usedom. In Freiburg im Breisgau stand die Wetterstation so nah an einer sonnenbeschiene- nen Hauswand, dass sie wunderbarerweise sen- sationelle Werte lieferte, die laufend im Deut- schlandfunk vorgelesen wurden und den falschen Ruf begründeten, dass es in Freiburg besonders warm sei. Das war natürlich für einen Ort, der schon im Luv des Schwarzwalds liegt, viel mehr Bewölkung hat und auch höher liegt als der Oberrheingraben, völliger Blödsinn. Inzwischen wurde die Wetterstation an den Freiburger Flug- platz verlegt, und seither kann die Stadt froh sein, noch in den Top 30 der wärmsten Orte Deut- schlands aufzutauchen.

Der im Durchschnitt wärmste Ort in Deutschland ist Heidelberg – allerdings nicht, weil es dort tagsüber besonders warm ist. Hei- delberg begründet seine Spitzenposition nachts, wenn oft ein föhniger Bergwind vom Odenwald runterweht und so die Ausbildung eines nächt- lichen Kaltluftsees verhindert. Tagsüber ist Hei- delberg völlig unauffällig, und wenn es nur um die auffälligsten Höchsttemperaturen zwischen 8 und 20 Uhr geht und wir die Nacht beiseite lassen, sind die wärmsten Orte an unpräntiö- sen Orten wie Köln-Stammheim oder Duisburg- Baerl zu finden.

Manche Rekorde aus der Vergangenheit sind heute nicht mehr nachvollziehbar, wie die ange- blichen minus 37,8 Grad im bayerischen Woln- zach-Hüll am 12. Februar 1929 als lange tiefste Temperatur in Deutschland. Sicher, der Botani- sche Garten in München hatte an jenem Tag auch muntere minus 31,6 Grad, aber dennoch liegt die Vermutung nahe, dass in Wolnzach-Hüll das Thermometer nicht zwei Meter über Boden in der Wetterhütte, sondern frei in Bodennähe lag – das macht nämlich an einem kalten, klaren Win- termorgen gerne nochmal fünf Grad Abzug aus, weil kalte Luft schwerer ist als warme.

Alte Hitzerekorde wurden auch schon mal nicht anerkannt, weil ihre Messung nicht der Zulassungsprozedur entsprach, etwa die Wet- terhütten länger nicht gestrichen wurden und wärmeabsorbierend vor sich hin gilbten oder schmückende, aber wärmende Blumenkisten di- rekt unter die Hütte gehängt wurden. In der Au- tomatisierungswelle von Wetterstationen sind die Holz-Wetterhütten deshalb nach und nach ab- geschafft und durch ventilierter Thermometer er- setzt worden. Ein elektrischer Temperaturfühler

sitzt in einem Rohr, durch das die Luft von einem Ventilator in erheblicher Geschwindigkeit durch- gesaugt wird, um die korrekte Lufttemperatur messen zu können.

Diese Ventilatoren haben aber wiederum den Nachteil, dass sie nicht ewig laufen und dann mühsam ausgetauscht werden müssen. Manch- mal sterben sie auch nur langsam, was häufig zu schwer zu erkennen ist, um rechtzeitig eingrei- fen zu können. Wir – das heißt die Kachelmann GmbH und die Versicherung Vereinigte Hagel (*Anm. d. Red.*) – stellen gerade ganz Deut- schland mit Wetterstationen voll. Ziel ist es, in jeder Gemeinde eine Station zu haben. Zur korrekten Temperaturmessung wurden dabei Antike und Moderne zusammengeführt: Eine metallene Wet- terhütte von außen im strahlenden, witterungsbe- ständigen Weiß, innen aber aufgrund neuer Er- kenntnisse die Lamellen schwarz. Das bisschen Strahlung, was noch von außen durchkommt, wird so durch die Wand, aber nicht durch den Temperaturfühler in der Wetterhütte absorbiert. Studien durch den englischen und australischen Wetterdienst bestätigen, wie gut das funktioniert.

WETTERLEGENDEN

Dennoch wird man natürlich in einem Land, in dem man naturwissenschaftliche Fächer in der Schule „abwählen“ kann, althergebrachten Aber- glauben nie weg bekommen. So ist etwa die Le- gende, dass es eine „Temperatur in der Sonne“ gäbe, völliger Unsinn. Es gibt nur eine Lufttem- peratur – hängt man ein Thermometer in die Son- ne, misst es seine eigene Temperatur. Die besten Ergebnisse für ein Facebook-Posting à la „BEI MIR SIND ES 50 GRAD!!!11!!“ liefert daher ein schwarzes Thermometer. Wir müssen nicht da- rum herum reden: Deutschland ist ein Zentrum für Aberglauben. Es mag eine Bundeszentrale für politische Bildung, aber keine solche für Allge- meinbildung geben – mit fatalen Folgen.

So hält sich bis heute der wunderliche Begriff der „Mittagshitze“, obwohl in Wahrheit an hei- ßen Sommertagen die höchste Temperatur ge- gen 18 Uhr gemessen wird. Traurig legendär ist der Deutschen Angst vor dem Durchzug, die je- den heißen Sommer viele alte Menschen das Le- ben kostet, weil sie in Räumen mit geschlosse- nen Fenstern jämmerlich vor sich hinstirben, statt in ihren Wohnungen mit Ventilatoren für ausreichend Belüftung zu sorgen. Und ja, damit

die Feuchtigkeit des Schwitzens abgeführt wird, müssen die Ventilatoren nicht nur angeschaltet, sondern auch die Fenster auf sein. Tödlich auch die deutsche Legende, die Fenster zu schließen, damit die „Hitze nicht reinkommt“ – alles Reisen hat leider nicht geholfen, dass die Erkenntnis gereift ist, dass 35 Grad bei trockener Luft viel angenehmer sind als 25 Grad bei Windstille im Regenwald.

Man wird auch nie verstehen, wie die einheimischen Legenden vom „steifen Hals“ entstanden sind, der Menschen scheinbar widerfährt, sobald sie mit einem Wind von zwei Kilometern pro Stunde im Büro konfrontiert werden. Dieselben Leute freuen sich im Urlaub auf den Kanaren über die tägliche steife Passatbrise und können dort auch beschwerdefrei Cabrio fahren. Die Bauarbeiter dort, laufend dem schrecklichen Wind ausgesetzt, klagen auch nie über Beschwerden.

Höhepunkt der wetterbedingten „German Angst“ ist das „Biowetter“, ebenfalls eine deutsche Erfindung. Selbst Ärzte – man kann damit Geld verdienen, dann muss man es mit dem hippokratischen Eid nicht so genau nehmen – verbreiten den hanebüchenden Unsinn, dass es den Körper belastet, wenn es im Frühling tagsüber mal plus 10 Grad tagsüber sei und eine Woche später plus 15. Die Medien sind dann voll davon, dass uns dieses „Achterbahn-Wetter“ fix und fertig mache, während wir aber via Ferienflieger innerhalb weniger Stunden Temperaturunterschiede von minus 10 zu plus 30 Grad erleben und diese wiederum besser aushalten. Man darf dabei auch nicht vergessen, dass wir einen ganzen Winter lang nicht weinend zusammenbrechen, wenn es von der Kälte draußen in die gemütliche Stube geht – von der Achterbahnfahrt der Temperaturen in der Sauna ganz zu schweigen.

VOM WERT DER NATURWISSENSCHAFTEN

Die Gruselgeschichten des Biowetters funktionieren auch und vor allem wegen des Notstands bei der naturwissenschaftlichen Bildung. Wüsste man noch, dass alle acht Höhenmeter der Luftdruck um ein Hektopascal sinkt, hätte es das eingebilddete Raunen über die Beschwerden bei herannahenden Tiefs oder „Wetterwechsel“ etwas schwerer. Jeder Kölner oder Bonner, der ins Bergische, in die Eifel oder ins Siebengebirge fährt, erlebt einen – beschwerdefreien – Wetter-

wechsel. Wer testen möchte, ob ein Wetterwechsel wirklich etwas ausmacht, kann notfalls auch eine Aufzugfahrt in einem Frankfurter Hochhaus als Testplattform benutzen.

Einbildung ist ein scharfes Schwert, wovon Scharlatane aller Art profitieren. Es ist durch eine Reihe wissenschaftlicher Studien nachgewiesen, dass Hagelflieger – also Flugzeuge, die Silberjodid-Partikel ausbringen, um die Hagelbildung zu verhindern – keinen Einfluss auf die Hagelbildung haben. Dennoch werden sogar Steuergelder ausgegeben, damit bauernschlaue Bauernfänger mit einem teuren Hobby das gute Gefühl haben können, die Flugstunden von anderen bezahlt zu bekommen. Auch hier hülfe das Wissen, dass ein bestimmter Ort nur alle 20 bis 30 Jahre von einem Großhagel heimgesucht wird – also können sich die scharlatanesken Hagelflieger gut ausrechnen, dass jedes Jahr begeisterte Menschen feststellen, dass es schon wieder nicht gehagelt hat. Falls Sie auch günstig ans Geld anderer Menschen herankommen möchten: Behaupten Sie einfach, dass Sie eine Anti-Weltuntergangs-Maschine erfunden hätten. Jeden Morgen werden Sie nach dem Prinzip der Hagelflieger eine Erfolgsmeldung abgeben könnten: Es hat wieder geklappt! Werfen Sie Geld über mich.

Besonders grotesk wird es, wenn in einzelnen Landkreisen in Baden-Württemberg und Sachsen Menschen durch sogenannte Hagelkanonen belästigt werden. Menschen mit Affinität zum persönlichen Urknall schießen bei Gewittern Kanonen ab und erzählen anderen Menschen, dass der damit verbundene Knall Hagelkörner trotz des stürmischen Getöses in der drei Kilometer höheren Gewitterwolke erschrecken und zur spontanen Desintegration derselben führen würde.

Wenn niemand mehr etwas weiß, glauben alle alles. Menschen bei uns glauben, dass Flüsse und Kanäle „Wetterscheiden“ seien und das Wetter beeinflussten. Nein, in keiner Form. Nicht einmal der Nebel ist da, weil da ein Tal ist, sondern weil da ein Fluss ist – vom Rauchen des Flusses bei strengem Frost abgesehen, aber das hat wiederum nichts mit Nebel zu tun. Menschen bei uns glauben, dass der Mond einen Einfluss aufs Wetter hätte, weil sie nicht wissen, dass der Mond auf der ganzen Welt genau gleich aussieht und somit der Aberglaube, der Mondwechsel entspräche einem Wetterwechsel, sofort ad absurdum geführt wird. Menschen glauben an den Hundertjährigen Kalender, der auf der Theorie beruht, dass sich

das Wetter an einem fränkischen Kloster, das im Mittelalter durch einen Abt sieben Jahre lang beobachtet wurde, bis ans Ende der Zeit alle sieben Jahre wiederholte. Die gute Nachricht für sparsame Menschen ist: Hat man sieben Jahre den „Hundertjährigen“ gekauft, hat man ausgesorgt – denn im achten Jahr hat man den identischen Inhalt vom ersten.

Naturwissenschaftliche Bildungsferne einer Bevölkerung ist eine gute Basis für Geschäftemacher aller Art. Alle halten alles für möglich, und wenn Sie in Ihre Suchmaschine des Vertrauens „Wetter Ostern 2020“ eingeben, sehen Sie wohl schon im März schöne Ergebnisse, die sicher gut geklickt werden: Dass Experten „erste Vorhersagen wagen“ und andere Versatzstücke aus dem Stehsatz des nie versiegenden Fundus des frei erfundenen Schwachsinn.

Die Meteorologie hat große Fortschritte gemacht, aber es wird noch länger gehen, bis irgendjemand einen Monat ante festum weiß, ob es nun regnet oder nicht. Unter der Zunahme dieser vermeintlichen Vorhersagen müssen wir alle leiden, weil so immer mehr rasende Stürme und „Russenpeitschen“ auf uns zu kommen, die es in Wahrheit nie gibt. Etwa 90 Prozent aller Medienberichte zum Thema Wetter und Klima liegen ganz oder teilweise daneben. Es wehrt sich kein Presserat, und wir können nur hoffen, dass Petrus an der Himmelspforte gerade bei Unsauberkeiten zu diesem Thema präpurgatorisch die Fehlbaren darauf hinweisen wird, dass das stete Alarm-schreien schlimme Folgen haben kann: Es nimmt dann niemand mehr ernst, wenn etwa wirklich mal ein ungewöhnlich starker Sturm kommt.

Wir dürfen auf alle Fälle gespannt sein, wie der Winter 2019/20 ausfällt. Die einzig seriösen Vorhersagen des Europäischen Zentrums für mittelfristige Wettervorhersagen sehen durchweg leicht zu warme Wintermonate voraus, was zu den unvermeidlichen „Rekordwärme“-Schlagzeilen geführt hat – gleichzeitig wurde aber auch anderswo „Rekordkälte“ vorhergesagt, weil angeblich die Sonne müder würde. Auch hier gilt die 90-Prozent-Regel: Dass ein Monatsdurchschnitt ein Grad über dem Normalwert liegt, kann vieles bedeuten: eine Woche extrem gesäßkalt und drei Wochen deutlich zu warm oder zwei Wochen tierisch warm und zwei Wochen deutlich zu kalt – und alle Kombinationen dazwischen. Wir wissen, dass wir nichts wissen. Gut wäre, wenn das alle wüssten.

WIE GEHT ES WEITER?

Als Sohn eines Beamten der Deutschen Bundesbahn – er war damals sehr stolz auf das Plakat mit dem Wetter, Sie wissen schon – bin ich dennoch versucht, Ihnen am Ende dieses Textes Mut zu machen. Der technische Fortschritt der Meteorologie geht weiter, Landwirte können auf ihr Grundstück klicken und erhalten mit einer Auflösung von 125 Metern nach einer Nacht mit lokalen Gewittern die Information, wie viel es am einen und anderen Ende des Ackers geregnet hat, damit der Trecker nicht festfährt. Bald gibt es ein operatives Vorhersagemodell mit einer Auflösung von 100 mal 100 Metern, das sich um Stadtmeteorologie, urbane Hitzepole, Frischluftströme und Schadstoffursachen kümmert und, so ist zu erwarten, Dinge herausfinden wird, die manchen auch politisch geförderten Trend der vergangenen Jahre ad absurdum führen: Wenn man in Deutschland wieder saubere Luft unterhalb der Grenzwerte möchte, müsste man nur alle Holzöfen stilllegen.

Schon deren Klimaneutralität ist eine freie Erfindung aus dem Baumarktprospekt, die leider von vielen geglaubt wird – viel schlimmer aber ist: Die heimischen Holzöfen sind aktuell die größte Quelle für Feinstaub (abends und nachts auch für Stickoxide), und weil viele Waldverbrenner auch Müllverbrenner sind, gibt es auch wieder Dioxin in den trampolinierten Vorgärten. Das Ablenkmännchen mit den Straßensperrungen für Diesel hat viel Schönes, aber Sie werden in ein paar Jahren selber lernen, dass sich die Feinstaubbelastung abends und nachts in Wohngebieten vervielfacht hat. Bald muss Willy Brandt auferstehen, um zu sagen, dass es nachts nicht mehr stinken soll, nicht nur über der Ruhr. Dass es ein Menschenrecht ist, ein Kinderzimmer auch mal lüften zu dürfen zwischen 18 und 8 Uhr, wenn es sich andere „gemütlich“ machen. Und dass dem Waldverbrennen am Amazonas und dem im heimischen Kaminofen mindestens eine Sache gemeinsam ist: Es ist in beiden Fällen eine Umweltkatastrophe.

Und dieser Text ist nur dafür da, damit niemand in ein paar Jahren sagen kann, dass man das nicht gewusst hätte, damals.

JÖRG KACHELMANN

ist Meteorologe, Unternehmer und Moderator. Er betreibt unter anderem die Wetterseite kachelmannwetter.com.

EINE GESCHICHTE DES WETTERWISSENS

Linda Richter

Das Wetter und insbesondere der Blick auf das künftige Wetter beeinflussen auf vielerlei Weise, wie wir unseren Alltag verbringen. Für den Fall, dass es regnet, wird ein Schirm eingepackt. Ein warmer Tag lädt zum Eisessen und Sonnenbaden ein. Gibt es ein unverfänglicheres Thema als das Wetter, um mit anderen Menschen ins Gespräch zu kommen?

Diejenigen, die sich mit der Geschichte dessen beschäftigen, was wir über das Wetter wissen, betonen daher oft, dass es sich um einen besonders demokratischen Erkenntnisgegenstand handele. Prinzipiell, so das Argument, sei das Wetter allen Menschen zugänglich, weshalb alle etwas darüber wissen dürften und könnten.⁰¹ Zwar ist es zutreffend, dass das Wetter als Gegenstand der Meteorologie nicht im hermetisch abgeriegelten Labor untersucht wird, sondern überall unmittelbar erfahrbar ist. Ein großer Teil der gigantischen Maschinerie, durch die heutzutage Wissen über das Wetter produziert wird, ist für die meisten Menschen aber im Normalfall unsichtbar.⁰² Auf der Ebene des Wissens über meteorologische Phänomene selbst könnten viele wohl nur mit einem Schulterzucken auf die Frage antworten, wie eigentlich Regen entsteht.

Dies mag etwas mit der hochdifferenzierten Aufgabenteilung der Gesellschaften des 20. und 21. Jahrhunderts zu tun haben. Die heutige Meteorologie beschäftigt sich mit komplizierten dynamischen Prozessen in der Atmosphäre, analysiert diese mit einem überwiegend physikalischen Werkzeugkasten und berechnet mit computergestützten Verfahren Wettervorhersagen. Die dafür notwendige wissenschaftliche Ausbildung und technische Infrastruktur sind hohe Schwellen, die nicht ohne Weiteres von beliebigen Einzelpersonen überschritten werden können. Gleichzeitig hat „Wetter“ unter anderem medizinische, agrarische, kulturelle und ökologische Dimensionen. Dass seit der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts dennoch die Physik die wissenschaftliche Analyse des Wetters dominiert, ist, wie im Folgenden gezeigt werden soll, keine Selbstverständlichkeit, sondern Ergebnis eines historischen

Prozesses. Zuvor konkurrierten – mit zunächst offenem Ergebnis – in einem deutlich heterogeneren Feld verschiedene Wissensformen miteinander, die sich unterschiedliche Vorstellungen von der Kausalität des Wetters, dessen Beobachtung und der Notwendigkeit seiner Vorhersage machten.

WETTERWISSEN ZWISCHEN ARISTOTELES UND ALLTAGSPRAXIS

Versuche, das Wetter zu verstehen, aufzuzeichnen und vorherzusagen, lassen sich fast beliebig weit zurückverfolgen. Sie finden sich in einer Vielzahl gelehrter Quellen aus mehreren antiken Kulturen: Mesopotamische Astronomen vermerkten auf Tontafeln neben den Positionen der Himmelskörper auch Wetterbeobachtungen und deuteten Himmelszeichen für ihre Könige.⁰³ Ein chinesisches Traktat diskutierte den Einfluss vorherrschender Windrichtungen auf menschliche Gesundheit.⁰⁴ Mit Hippokrates, Aristoteles und Theophrast verfassten einige der bekanntesten Gelehrten der klassischen Antike meteorologische Werke.⁰⁵

Die gelehrten Diskurse des Mittelalters und der Frühen Neuzeit kreisten vorrangig um die Rückübersetzung und Kommentierung der griechisch-römischen Werke, allen voran der „Meteorologica“ des Aristoteles, der sich darin der philosophischen Erklärung und Kausalität von Wetterphänomenen widmete.⁰⁶ Ebenfalls seit der Antike wurde Wetter astrologisch vorhergesagt, also mit verschiedenen Planetenkonstellationen in Beziehung gesetzt.⁰⁷ Diese sogenannte Astrometeorologie wurde zwar in der Zeit der Aufklärung zum Aberglauben erklärt, war aber über Jahrhunderte hinweg gelehrte Praxis.⁰⁸ Vom Astronomen und Naturphilosophen Johannes Kepler etwa wird berichtet, dass er Anfang des 17. Jahrhunderts so davon überzeugt war, bestimmte Planetenkonstellationen mit Wetterveränderungen korrelieren zu können, dass er seine astronomischen Beobachtungen infrage stellte, wenn das Wetter konstant geblieben war.⁰⁹

Jenseits dieses gelehrten Höhenkamms ist für alle diese Epochen unklar, über welches Wetter-

wissen weniger privilegierte Menschen verfügten, um beispielsweise ihre tägliche Arbeit in der Landwirtschaft anzuleiten. „Bauernpraktiken“, die seit dem Spätmittelalter eine gewisse Popularität genossen, lieferten Ratschläge und Prognosen auf der Grundlage astrologischer Vorstellungen. Sie wurden jedoch vermischt mit den „Bauernregeln“. Diese konnten in Erfahrung gegründet sein, schrieben aber auch bestimmten Tagen besondere prognostische Kräfte zu und sortierten landwirtschaftliche Tätigkeiten in die Chronologie des Kirchenjahrs ein.¹⁰ Mit welchem Erfolg sie verwendet wurden, und welches Erfahrungswissen Bauern mündlich in die nächste Generation weitergaben, darüber kann in einer Geschichtsschreibung, die Schriftquellen begünstigt, nur spekuliert werden.

Schlägt man eines der Lexika auf, die in der Epoche der Aufklärung das vorhandene Wissen inventarisieren sollten, fällt auf, dass gelehrtes und alltägliches Wetterwissen getrennt voneinander behandelt wurden. In englisch-, deutsch- und französischsprachigen Enzyklopädien des mittleren 18. Jahrhunderts wird in den Einträgen zur „Meteorologie“ fast ausschließlich die aristotelische Unterscheidung feuriger, luftiger oder wässriger

Meteore referiert. Die jeweils landessprachlichen Einträge zu „weather“, „Witterung“ und „temps“ hingegen bieten ein buntes Sammelsurium aus medizinischen Überlegungen, prognostischen Zeichen und vielem mehr.¹¹ Bevor sich hundert Jahre später, ab etwa 1850, die Meteorologie als wissenschaftliche Disziplin zu formieren begann, sortierte sich das gesamte Wissensfeld neu. Aristotelische Deutungen verschwanden und die utilitaristischen Ansprüche der Aufklärer führten dazu, dass die Beziehung von gelehrtem und alltagspraktischem Wetterwissen neu verhandelt wurde.¹²

ZEITGENÖSSISCHE AKTEURE

Eine geeignete Möglichkeit, die Entwicklungen der Meteorologie im Zeitraum von 1750 bis 1850 zu erfassen, ist es, sich ihr über die zeitgenössischen Vorstellungen dessen zu nähern, was das Wetter verursachte. Aus der kausalen Struktur, die ein beliebiger Akteur vertrat, lässt sich ableiten, wie dieser das Wetter beobachten und vorhersagen wollte. Auf Basis zahlreicher Aufsätze in zeitgenössischen Zeitschriften, längerer Abhandlungen und Archivakten lassen sich dabei für die deutschen Länder drei mehr oder weniger distinkte Wissensformen herausarbeiten:

Die **Semiotiker** gingen davon aus, dass alle natürlichen Ereignisse als Glieder einer unverrückbaren Kette miteinander verbunden waren. Dies barg den Vorteil, dass sich künftige Wetterveränderungen für sie schon in der Gegenwart ankündigten. Der Aلدorfer Professor für Mathematik und Physik Michael Adalbuler (1702–1779) etwa wies die Vorstellung plötzlicher Wetterwechsel entschieden zurück – vielmehr vollzögen diese sich „nach und nach, und meistens unmerklich“.¹³ Waren die Menschen durch ihre Alltagsgeschäfte zu abgelenkt, um Veränderungen selbst zu spüren, konnten sie sich zunutze machen, dass andere Lebewesen und Gegenstände empfindlicher waren und deshalb als Wetterzeichen taugten. Der noch heute sprichwörtliche tiefe Flug der Schwalben, ein nächtlicher Hof um den Mond, ein starkes Schwanken des Barometers – all dies waren potenziell

01 Vgl. Vladimir Janković, *Reading the Skies. A Cultural History of English Weather, 1650–1820*, Chicago–London 2000, S. 142; Jan Golinski, *British Weather and the Climate of Enlightenment*, Chicago–London 2007, S. 67.

02 Vgl. Paul N. Edwards, *A Vast Machine. Computer Models, Climate Data, and the Politics of Global Warming*, Cambridge–London 2019, S. 22.

03 Vgl. Francesca Rochberg, *The Heavenly Writing. Divination, Horoscopy, and Astronomy in Mesopotamian Culture*, Cambridge 2004, S. 148.

04 Vgl. Paul Ulrich Unschuld, *Huang Di nei jing su wen. Nature, Knowledge, Imagery in an Ancient Chinese Medical Text*, Berkeley–Los Angeles–London 2003, S. 183–189.

05 Vgl. Liba Taub, *Ancient Meteorology*, London–New York 2003.

06 Vgl. Pieter L. Schoonheim, *Aristotle’s Meteorology in the Arabico-Latin Tradition*, Leiden 2000; Paul Lettinck, *Aristotle’s Meteorology and Its Reception in the Arab World*, Leiden 1999.

07 Vgl. Daryn Lehoux, *Astronomy, Weather and Calendars in the Ancient World. Parapegmata and Related Texts in Classical and Near Eastern Societies*, Cambridge 2007.

08 Vgl. Anne Lawrence-Mathers, *Medieval Meteorology. Forecasting the Weather from Aristotle to the Almanac*, Cambridge 2019.

09 Vgl. Judith V. Field, *Kepler’s Geometrical Cosmology*, London–New York 2013, S. 129.

10 Vgl. Gustav Hellmann, *Meteorologische Volksbücher. Ein Beitrag zur Geschichte der Meteorologie und zur Kulturgeschichte*, Berlin 1895, S. 36–45.

11 Vgl. Janković (Anm. 1), S. 31.

12 Vgl. Golinski (Anm. 1), S. 213f.

13 Michael Adalbuler, *Kurze Beschreibung der Barometer und Thermometer auch andern zur Meteorologie gehörigen Instrumenten*, Nürnberg 1768, S. 21.

le Zeichen für kommenden Niederschlag. Neben der Medizin war, betonte Adelbulner, diese „Kunst das Wetter zu prognostizieren“ eine „erlaubte Zeichendeuterei“.¹⁴ Er sprach sie so vom Vorwurf der Wahrsagerei oder des astrologischen Aberglaubens frei. Der Vorteil der Semiotik des Wetters bestand darin, dass ihre Vertreter die eigentlichen Ursachen von Wetterphänomenen nicht kennen mussten. Solange zum Beispiel immer dann ein Sturm aufzog, nachdem sich eine bestimmte Wolkenart am Himmel gezeigt hatte, galt das Zeichenverhältnis von Wolken zu Sturm als etabliert.

Ganz anders verhielt es sich bei den **Physikern** des Wetters. Diese hatten das Ziel, die komplexen Kausalketten innerhalb der Atmosphäre zu entwirren, die zugrunde liegenden Naturgesetze zu finden und möglichst zu quantifizieren. Dass mit der Atmosphäre – im Gegensatz zu anderen Teilgebieten der Physik – aufgrund ihrer Größe und ihres komplizierten Aufbaus keine Experimente angestellt werden konnten, erwies sich dabei als großes Problem. Doch waren vor allem die Physiker des Wetters im 18. Jahrhundert noch zuversichtlich, dass sich irgendwann Gesetze offenbaren würden, wenn Wetterbeobachtungen mit Messinstrumenten nur lange genug fortgesetzt würden. Der französische Naturforscher und Geistliche Louis Cotte (1740–1815) etwa sah es als erwiesen an, dass es „nichts Gleichförmigeres als Naturvorgänge“ gab. „Sofern man darin auf eine Wunderlichkeit zu stoßen glaubt“, verkündete er, „dann nur, weil man sie noch nicht lange genug beobachtet hat“.¹⁵

Aus Sicht der **Organiker** standen die Vorgänge in der Luft in Wechselwirkung mit anderen Vorgängen in der Natur, die deshalb in jeder Untersuchung des Wetters ebenfalls mit berücksichtigt werden mussten. Alle Bereiche der Natur waren für sie zusammenhängende Teile eines gegliederten Ganzen. Aus einer Beobachtungsreihe, die das preußische Kultusministerium zwischen 1817 und 1820 unterhielt, stammt das Plädoyer des Apothekers und Chemikers Sigismund Friedrich Hermbstädt (1760–1833), in dem er sich für eine solche ganzheitliche Perspektive auf das Wetter einsetzte. Ziel der Reihe, so Hermbstädt 1816 in einem Gutachten der Wissenschaftlichen Deputation für das Medizinalwesen, muss-

te es sein, „eine Wissenschaft der Meteorologie auf (...) Erfahrung zu gründen“ und „bestimmte Gesetze, über den Einfluß der Veränderungen im Dunstkreis, auf die herrschenden Krankheiten der Bewohner einer Provinz oder auf die lebenden Erzeugnisse der Pflanzenwelt“ abzuleiten.¹⁶ Wie die anderen Organiker forderte er, parallel zu den meteorologischen auch botanische sowie human- und veterinärmedizinische Beobachtungen anzustellen. Sie hofften so, zum Beispiel das Auftreten bestimmter Krankheiten auf auffällige Wetterlagen zurückführen zu können.

ZEITGENÖSSISCHE DISKURSE

Weil sich im mittleren und späten 19. Jahrhundert das mechanische Ursachenverständnis der Physiker des Wetters schließlich auf Kosten der anderen beiden Wissensformen als wissenschaftliche Meteorologie durchsetzte, überwog in der Geschichtsschreibung bislang der Fokus auf deren Vorform. In einer Zusammenstellung deutscher Quellen, die der preußische Meteorologe Gustav Hellmann (1854–1939) im Jahr 1883 veröffentlichte, räumte dieser zum Beispiel ein, medizinische Schriften nicht aufgenommen zu haben, weil sie „ziemlich arm“ an eigener Forschung seien.¹⁷ So verständlich die Notwendigkeit des Bibliografen ist, eine Auswahl zu treffen, so problematisch ist ein alleiniger Fokus auf physikalische Texte. Denn ein auf diese Weise bereinigter Quellenkorpus legt eine inhärente Überlegenheit gegenüber konkurrierenden Wissensangeboten nahe. Aus ergänzenden semiotischen und organischen Quellen hingegen lässt sich herleiten, dass dieses Bild so nicht stimmt. An zeitgenössischen Kommentaren zur Beobachtung und Vorhersage des Wetters kann vielmehr gezeigt werden, dass die konkurrierenden Wissensangebote teils wegen der Schwäche der Physik erst notwendig wurden und sich unter Umständen sogar als überlegen herausstellten.

Wetterbeobachtung

Aus der kausalen Struktur der drei Wissensformen ergeben sich je unterschiedliche Rollen für

¹⁴ Ebd., S. 7.

¹⁵ Louis Cotte, *Traité de Météorologie*, Paris 1774, S. 519 (eigene Übersetzung).

¹⁶ Zit. nach Linda Richter, *Semiotik, Physik, Organik. Eine Geschichte des Wissens vom Wetter (1750–1850)*, Frankfurt/M.–New York 2019, S. 358.

¹⁷ Gustav Hellmann, *Repertorium der deutschen Meteorologie*, Leipzig 1883, S. xii.

empirisch erhobene Daten in der Wissensproduktion. Im Fall der Organik fällt auf, dass diese in der Zeit zwischen 1750 und 1850 in zwei verschiedenen Ausprägungen auftrat: Induktive Organiker wie Hermbstädt, der organische Wechselwirkungen beschreiben wollte, nahmen sich vor, allgemeine Erkenntnisse und Naturgesetze aus einer Vielzahl einzelner Beobachtungen ableiten. So waren in der Medizin statistische Untersuchungen, bei denen gehäufte Krankheitsfälle mit bestimmten Wetterphänomenen korreliert wurden, seit dem 17. Jahrhundert verbreitet, konnten aber kaum greifbare Ergebnisse vorweisen.¹⁸ Ab etwa 1800 engagierten sich daher einige sogenannte romantische Naturforscher und Ärzte für eine Organik des Wetters, die im Gegensatz zum induktiven Ansatz schon vorab formulierte Hypothesen prüfen sollte. Für den Philosophen Friedrich Wilhelm Joseph Schelling (1775–1854) zum Beispiel zeigte die Meteorologie vor allen anderen Disziplinen das Unvermögen mechanischer Erklärungen, den „Gang der Natur im Großen zu erforschen“.¹⁹ Und dass die Physiker des Wetters nach dem Vorbild der Astronomen mehrmals täglich Messwerte meteorologischer Instrumente in endlosen Tabellen notierten, produzierte aus Sicht des Arztes Johann Christian Reil (1759–1813) einen „rohen, geistlosen“ Berg „sich selbst nicht kennende[r] Empirie“. Reil und andere setzten dem daher spekulative Hypothesen entgegen, die das „blinde Herumtappen“ von Beobachtungen „zügeln“ und ihnen eine Richtung geben sollten.²⁰

Bei der näheren Untersuchung einer organischen Beobachtungsreihe in Preußen, in deren Rahmen mit Reil und Hermbstädt sowohl Vertreter der spekulativen als auch der induktiven Ausprägung beratend tätig gewesen waren, zeigte sich jedoch schnell, dass die Organiker ihren selbst gesetzten Ansprüchen nicht gerecht wurden. Ein derartig umfassender Ansatz des Wetterwissens bedurfte eines gleichermaßen komplexen Beobachtungsapparats, an dessen Aufbau, Administration und Auswertung die Organiker scheiterten. Formierte sich insbesondere der spekula-

tive Zweig als Gegenprogramm zur Physik des Wetters, blieben die Hypothesen oft zu vage und rätselhaft, als dass sie auf nachvollziehbare Weise hätten belegt oder widerlegt werden können.²¹

Ein Konflikt, den vor allem Semiotiker und Physiker des Wetters austrugen, war die Frage, welchen Stellenwert Messinstrumente bei Wetterbeobachtungen haben sollten. Die Physiker favorisierten diese, weil sie eine Quantifizierung des Wetters und seiner verschiedenen Parameter verhiessen. Insbesondere für koordinierte Beobachtungsreihen waren aber fehlende Vergleichbarkeit verschiedener Instrumente und teils starke Abweichungen in der Beobachtungspraxis große Probleme – von der Frage, wie genau aus Beobachtungsdaten Gesetze abzuleiten waren, einmal abgesehen. Parallel verwendete Temperaturskalen (üblicherweise nach Fahrenheit, Celsius oder Réaumur) ließen sich noch relativ leicht rechnerisch vereinheitlichen. Darüber hinaus unterschieden sich aber allein Thermometer noch durch die jeweilige Einteilung der Skalen, die Bauart des Instruments, den Durchmesser der Glasröhren sowie durch die Flüssigkeit, die darin enthalten war.²² Von wenigen Ausnahmen wie der Mannheimer Meteorologischen Gesellschaft (1780–1792) abgesehen,²³ war es zwischen 1750 und 1850 nicht üblich, Beobachter mit identischen Instrumenten aus derselben Werkstatt auszustatten.

Am Gebrauch von Instrumenten kritisierten viele Semiotiker, dass diejenigen, die (wie beispielsweise Landwirte) für ihren Lebensunterhalt am meisten auf verlässliche Wettervorhersagen angewiesen waren, sich entweder gar keine oder jedenfalls keine hochwertigen Instrumente leisten konnten – man solle sich daher lieber auf die Zeichen der Natur verlassen.²⁴ Eine verblüffende Menge an Autoren im deutschsprachigen Raum bejubilte daher um 1800 die umfassen-

18 Vgl. Andrea Rusnock, *Vital Accounts. Quantifying Health and Population in Eighteenth-Century England and France*, Cambridge 2002, S. 109–119.

19 Friedrich Wilhelm Joseph Schelling, *Von der Weltseele*, Hamburg 1798, S. 135.

20 Zit. nach Richter (Anm. 16), S. 452, S. 446.

21 Vgl. Linda Richter, *The Meteorology and Medicine of the Romantic Era in Context. Henrik Steffens' Ideas on Medical Meteorology (1811) and Its Reception by the Prussian State*, in: *NTM. Zeitschrift für Geschichte der Wissenschaften, Technik und Medizin* 2/2019, S. 145–163, hier S. 157f.

22 Vgl. Johann Lorenz Böckmann, *Wünsche und Aussichten zur Vervollkommnung der Witterungslehre*, Wien 1779, S. 14.

23 Vgl. David Cassidy, *Meteorology in Mannheim. The Palatine Meteorological Society, 1780–1795*, in: *Sudhoffs Archiv. Zeitschrift für Wissenschaftsgeschichte* 1/1985, S. 8–25.

24 Vgl. Philipp Ernst Lüders, *Gespräche zwischen einem Prediger und einem Landmann*, Flensburg 1763, S. 85.

de Wettersemiotik des Franzosen Denis-Bernard Quatremère-D'Isjonval (1754–1830), die auf der Interpretation des Verhaltens von Hausspinnen basierte. Diese seien zwar womöglich nicht so präzise wie Instrumente, warb Quatremère-D'Isjonval selbst, dafür aber in jedem Haushalt vorhanden.²⁵ Ein anonymes Autor pries die Spinne als „sichersten Wetterprophet[en]“ und gab als Grund an, er habe „längst gewünscht, daß die besten Barometer, Thermometer, Hygrometer, Eudiometer, nicht im Besitz der Verzehrer, sondern der Erzeuger der Ernten“ wären.²⁶ Die Semiotik der Aufklärungszeit zeichnete sich also wesentlich durch ein egalitäres, aufklärerisches Anliegen aus. Es ist jedoch unklar, in welchem Maß sie tatsächlich Eingang in landwirtschaftliche Praxis fand, da semiotisches Wetterwissen von Bauern nicht schriftlich fixiert wurde.²⁷

Wettervorhersage

Die Semiotik des Wetters war die einzige Wissensform, deren Vertreter im gesamten Zeitraum zwischen 1750 und 1850 auf der Notwendigkeit bestanden, dass Wetterwissen praktischen Interessen zugutekommen musste. Eine prognostische Praxis war Semiotikern wichtiger als eine hochentwickelte Theorie. Ihre Konkurrenten attestierten auch bereitwillig, dass die Deutung von Wetterzeichen funktionierte. Der Schweizer Naturforscher und Alpinist Horace-Bénédict de Saussure (1740–1799) etwa klagte, dass es für Physiker des Wetters wie ihn „sehr demüthigend“ war, „wenn sie sehen, daß oft ein Schiffer oder ein Landmann, der weder Werkzeuge noch Theorie hat, die Veränderungen des Wetters viele Tage voraus, mit bewundernswürdiger Genauigkeit angiebt, die der Naturforscher bey aller seiner Hülfe von Wissenschaft und Kunst nicht würde gemuthmaasset haben“.²⁸ Doch waren diese Zeichen laut Saussure mehr ein vager Instinkt von rein lokaler Gültigkeit. Sie wurden wertlos, sobald die Zeichendeuter ihre angestammte Umgebung verließen – das universell gültige, erklärende Wissen blieb die Domäne der Physiker.

Organiker und Physiker des Wetters bestanden im 19. Jahrhundert hingegen darauf, erst dann prognostizieren zu können, wenn die Gesetzmäßigkeiten der Atmosphäre bis in ihre letzten kausalen Verwicklungen verstanden waren. Die Physik des Wetters durchlief dabei im Untersuchungszeitraum einen besonders auffälligen Wandel. In der zweiten Hälfte des 18. Jahrhunderts strebten ihre Anhänger noch praktische Verwertbarkeit an. Sie träumten insbesondere davon, sich wiederholende Wetterperioden zu identifizieren, bis Statistiker diesen Traum um 1800 platzen ließen.²⁹ Zusammen mit den politischen, sozialen und wissenschaftlichen Umbrüchen im Rahmen der Napoleonischen Kriege bot dies Gelegenheit für etwas, was ich als „solare Wende“ in der Physik des Wetters bezeichne. Deren prominenteste Vertreter Alexander von Humboldt (1769–1859), Ludwig Friedrich Kämtz (1801–1867) und Heinrich Wilhelm Dove (1803–1879) reduzierten die Kausalität des Wetters auf die wärmenden Sonnenstrahlen und erteilten damit eine endgültige Absage an die Stellungen der Planeten und des Mondes als Ursachen für Veränderungen. Sie beschränkten den Großteil ihrer Arbeit fortan auf die Analyse mittlerer Werte in vergleichender globaler Perspektive.³⁰ In den deutschen Ländern wurde die Physik des Wetters zwischen etwa 1800 und 1850 zu einem Vorläufer dessen, was in den 1880er Jahren zur sogenannten klassischen Klimatologie werden würde.³¹

Damit ging eine Abkehr der Physiker von der Vorhersage einher. Kämtz, zunächst Physikprofessor in Halle, später in Dorpat, beharrte 1840 darauf, dass der Meteorologe „durchaus nichts als Geschichtsschreiber der Witterung“ war, dessen einzige Aufgabe darin bestand, „die Gesetze der vergangenen Ereignisse aufzusuchen.“³² Wie von Historikern keine Prognosen zur künftigen Entwicklung menschlicher Gesellschaften gefordert würden, so Kämtz, so wenig dürfe man derartige Ansprüche an die Meteorologen stellen. In ähnlicher Weise bestanden auch die spekulativen Organiker, die nach 1800 innerhalb dieser Wissensform dominierten, darauf, dass Praxis erst auf ein voll-

25 Vgl. Denis Bernard Quatremère-D'Isjonval, *Araneologie oder Naturgeschichte der Spinnen*, Frankfurt/M. 1798, S. 41 f.

26 Anonym, *Die Spinne, der sicherste Wetterprophet*, in: *Neues Hannöversches Magazin* 79/1799, Sp. 1273–1276, hier: Sp. 1275.

27 Vgl. Richter (Anm. 16), S. 157–164.

28 Horace-Bénédict de Saussure, *Versuch über die Hygrometrie*, Leipzig 1784, S. 403.

29 Vgl. Richter (Anm. 16), S. 203–232.

30 Vgl. ebd., S. 242–267.

31 Vgl. Matthias Heymann, *Klimakonstruktionen. Von der klassischen Klimatologie zur Klimaforschung*, in: *NTM. Zeitschrift für Geschichte der Wissenschaften, Technik und Medizin* 2/2009, S. 171–197, hier: S. 173–177.

32 Ludwig Friedrich Kämtz, *Vorlesungen über Meteorologie*, Halle 1840, S. vii.

endetes theoretisches Verständnis folgen konnte und durfte: Werde die Wissenschaft nur mit „Seitenblick auf [ihre] Nutzenanwendung“ betrieben, so etwa Johann Christian Reil, drohe sie „einseitig“ zu werden – sei die „Idee des Lebens der Atmosphäre und ihrer Wechselwirkung mit ihren Umgebungen vollkommen klar und objectiv geworden“, würden sich Möglichkeiten zur Anwendung des Wissens dagegen von selbst ergeben.³³

METEOROLOGIE ALS INSTITUTIONALISIERTE WISSENSCHAFT

Ab etwa 1850 richteten viele Länder Europas nach und nach Strukturen ein, durch die Wetterbeobachtungen ebenso wie ein großer Teil der wetter- und klimabezogenen Forschung in staatlichen Institutionen gebündelt wurden. Das Preußische Meteorologische Institut mit Sitz in Berlin wurde 1847 gegründet, und andere deutsche Länder wie Baden oder Bayern zogen nach. Die meisten Wetterwarten auf Landesebene veröffentlichten ab den 1870er und 1880er Jahren regionale Wettervorhersagen.³⁴ Weil der Reichskanzler Otto von Bismarck jedoch fürchtete, dass staatlich sanktionierte Vorhersagen, die sich als falsch herausstellten, unangenehme politische Folgen haben könnten, lehnte er Vorhersagen auf nationaler Ebene ab.³⁵ Nach der Reichsgründung 1871 erfolgte daher keine Zentralisierung – erst das NS-Regime schuf 1934 einen zentralen Reichswetterdienst.³⁶

Die Gründung des Preußischen Meteorologischen Instituts war wesentlich von Alexander von Humboldt vorangetrieben worden, der zunächst Wilhelm Mahlmann (1812–1848) erfolgreich als Institutssekretär vorschlug, auf den ab 1849 Heinrich Wilhelm Dove für mehrere Jahrzehnte folgte. Beide waren Physiker, die folglich das Institut im Stil dieser Wissensform nach der „solaren Wende“ formten. Sie widmeten sich vor allem dem Auf-

bau eines Beobachtungsnetzes und der klimatologischen Beschreibung Preußens.³⁷ Forschung, die sich nicht nur mit mittleren, sondern mit momentanen Zuständen der Atmosphäre befasste, ihre Veränderungen nach thermo- und hydrodynamischen Prinzipien interpretierte und so dem näherkommt, was wir heute unter Meteorologie verstehen, hielt erst seit den 1880er Jahren Einzug. Zurückzuführen war dies wesentlich auf Einflüsse aus den USA, Großbritannien und Frankreich.³⁸ Sowohl auf politisch-institutioneller als auch auf wissenschaftlicher Ebene nahm die Meteorologie um die Jahrhundertmitte Abstand von Vorhersagen und entzog sich damit Ansprüchen auf praktische Verwertbarkeit.

Bedeutete dies, dass organisches und semiotisches Wetterwissen verschwanden? Die Antwort auf diese Frage unterstreicht, welche unterschiedlichen Entwicklungen eines Wissensbestandes möglich sind. Die Organik des Wetters wurde zunächst in medizinische Diskurse verlagert, bevor sie im 20. Jahrhundert als Medizin- oder Biometeorologie wieder zu einer Subdisziplin wissenschaftlicher Meteorologie wurde.³⁹ Spätestens mit den gesellschaftlichen Debatten über den Klimawandel sind Wechselwirkungen zwischen den Ökosystemen der Erde wieder in alle Munde. Wetterzeichen hingegen besetzen seit dem 19. Jahrhundert eine relativ konstante Nische im populärwissenschaftlichen Buchmarkt. Es ist also kaum von einem Niedergang dieser Wissensformen zu sprechen, sehr wohl aber von einer Privilegierung der Physik. Der Blick in die zeitgenössischen Quellen zeigt, dass diese nicht durch eine naturgemäße Überlegenheit dieser Wissensform zu begründen ist. Stattdessen sind die praktischen und erkenntnistheoretischen Mühen ihrer Vertreter offenkundig geworden. Diese frühere Epoche lehrt uns jedoch auch, wie wandelbar dieses komplizierte Wissensfeld ist. Zwar scheut sich, wie schon Kämtz bemerkte, die Geschichtsschreibung vor Prognosen. Doch wer auch in Zukunft Wandel in der Meteorologie vorher sagt, bewegt sich wohl auf der sicheren Seite.

LINDA RICHTER

ist promovierte Historikerin und wissenschaftliche Mitarbeiterin in der Arbeitsgruppe Wissenschaftsgeschichte der Goethe-Universität Frankfurt am Main. Sie forscht und publiziert schwerpunktmäßig zur Geschichte der Meteorologie und Klimatologie im 18. und 19. Jahrhundert.

l.richter@em.uni-frankfurt.de

³³ Zit. nach Richter (Anm. 16), S. 446.

³⁴ Vgl. Klaus Wege, Die Entwicklung der meteorologischen Dienste in Deutschland, Offenbach 2002, S. 51–61.

³⁵ Vgl. Hans-Günther Körber, Die Geschichte des Preußischen Meteorologischen Instituts in Berlin, Offenbach 1997, S. 30.

³⁶ Vgl. Wege (Anm. 34), S. 62–101.

³⁷ Vgl. Körber (Anm. 35), S. 11–17.

³⁸ Vgl. Richter (Anm. 16), S. 274–282.

³⁹ Vgl. Peter Höppe, Aspects of Human Biometeorology in Past, Present and Future, in: International Journal of Biometeorology 1/1997, S. 19–23.

ZUM STAND DER TECHNIK IN DER WETTERVORHERSAGE

Florian Pappenberger · Hannah L. Cloke

Die Wettervorhersage ist nicht nur elementarer Bestandteil unseres Alltags, sie hat auch einen immensen wirtschaftlichen und ökologischen Nutzen für die Gesellschaft: Landwirte planen auf ihrer Grundlage Anbau und Ernte; und ohne eine zuverlässige Vorhersage dürfte es in Deutschland schwerfallen, „im Jahr 2030 einen Anteil erneuerbarer Energien am Stromverbrauch von 65 Prozent zu erreichen“.⁰¹ Wetterprognosen schützen uns auch vor Gefahren. Sie warnen uns weltweit vor Überschwemmungen, Bränden, Wirbelstürmen und anderen Extremereignissen, mit denen wir immer wieder konfrontiert sind und deren Auswirkungen sich etwa in den Sommern 2018 und 2019 zeigten, als Dürre- und Hitzewellen auch in Europa zu Ernteaufschlägen führten und zahlreiche Menschenleben kosteten.⁰²

Die Wettervorhersage ist freilich keine neue Erfindung. Viele kennen wohl alte Bauernregeln wie „Abendrot – Gutwetterbot“, Morgenrot mit Regen droht“, eine mitunter erstaunlich präzise Kurzfristprognose, oder die weniger präzise Langfristprognose: „Ist der Januar hell und weiß, wird der Sommer gerne heiß“. Moderne Technologien bilden heute die Grundlage für eine Vielzahl von unterschiedlich visualisierten Wetterprognosen und -warnungen. Die Aufgabe des Meteorologen besteht (weiterhin) darin, über die künftige Wetterlage im Zielgebiet zu informieren und so die Entscheidungsfindung zu erleichtern. Die Grundlage dieser meteorologischen Interpretation ist üblicherweise die numerische (computergestützte) Wettervorhersage.

Für numerische Wettervorhersagen werden Gleichungen aus der Strömungs- und Thermodynamik genutzt, um Aussagen über den zukünftigen Zustand der Flüssigkeitshülle der Erde zu treffen. Ausgangspunkt der Prognose ist ein Schnappschuss vom (momentanen) Anfangszustand der Hülle. Dabei werden Atmo-, Hydro- und Biosphäre, Meeresbecken und Eis-

massen, der Einfluss der Sonne und viele weitere Faktoren berücksichtigt und statistisch verarbeitet. Auf Basis dieser Assimilation mehrerer Millionen Wettermessungen aus aller Welt wird der zukünftige Zustand des Geosystems berechnet, wobei neben Niederschlägen, Temperaturen, Wolkenbildungen oder der Bodenfeuchtigkeit sogar die Höhe von Meereswellen prognostiziert werden kann. Bekanntermaßen sind Prognosen aber nie absolut zuverlässig. Die Wetterprognose ist da keine Ausnahme. Diese Unsicherheit ergibt sich unter anderem daraus, dass wir ein unzureichendes Bild vom Ausgangszustand des Geosystems haben. Es ist nicht möglich, überall alles zu messen. Modelle sind stets nur Annäherungen an die Wirklichkeit. Aufgrund der chaotischen Natur der Atmosphäre können schon kleine Fehlberechnungen des Anfangszustands die jeweiligen Modellergebnisse verändern. Der US-amerikanische Mathematiker und Meteorologe Edward Lorenz hat diese Unsicherheiten mit der berühmten Metapher, dass „der Flügelschlag eines Schmetterlings in Brasilien (...) einen Tornado in Texas auslösen“ kann, bereits Anfang der 1970er Jahre auf den Punkt gebracht. So ist beispielsweise die Vorhersage extremer Wetterereignisse mit einem Vorlauf von mehreren Wochen oder Monaten höchst unsicher und durch mangelndes Wissen über die Vorgänge in der Atmosphäre in diesen Zeiträumen charakterisiert.

Moderne Wettervorhersagen, wie sie beispielsweise vom Europäischen Zentrum für mittelfristige Wettervorhersagen (EZMW) erstellt werden, simulieren daher immer mehrere Zukunftsszenarien. Diese Ensembles gehen von leicht abweichenden Anfangszuständen der Atmosphäre aus, folgen eigenen Verlaufslogiken und kommen zu leicht unterschiedlichen Ergebnissen. Sie versetzen Meteorologen in die Lage, Unsicherheiten bereits im Prognoseansatz zu erfassen. Diese Informationen können für Entscheidungen genutzt

werden, die volkswirtschaftlich vorteilhafter sind als Entscheidungen auf Grundlage von Prognosen, die sich nur auf ein einziges Zukunftsszenario stützen.

„STILLE REVOLUTION“

Im Durchschnitt ist man auf diese Weise heute in der Lage, das Wetter drei Tage im Voraus genauso präzise vorherzusagen wie vor 30 Jahren das Wetter am nächsten Tag. Der Schlüssel dafür ist unter anderem die explosionsartige Zunahme von Satellitendaten, ergänzt durch bodennahe Messungen von zahlreichen staatlichen und privaten Beobachtungsnetzen. Forscher bezeichnen die Entwicklung der Wetterprognose daher auch als „stille Revolution“.⁰³ Die Messdaten kommen von Bodenstationen, Schiffen, Flugzeugen, Wetterballons und Radiosonden, die unter der Schirmherrschaft der Weltorganisation für Meteorologie (WMO) stehen und entsprechend globalen, durch die WMO festgelegten Standards folgen. Zentral sind diese auch im Bereich von Telekommunikationssystemen wie dem Global Telecommunication System, mit dem Messdaten gesammelt und verteilt werden. Durch gemeinsame Standards wird sichergestellt, dass alle Mitglieder der WMO Zugang zu allen meteorologischen Daten haben, was einen Informationsaustausch in Echtzeit ermöglicht.

So werden Prognosen für jeden Ort auf unserem Planeten ermöglicht, was insbesondere für die Vorhersage von tropischen Wir-

belstürmen wichtig ist, da diese eine enorme Zerstörungskraft entfalten und regelmäßig zu schwersten Überschwemmungen und Sturmfluten führen. So bildete sich Ende August 2017 der Tropenzyklon „Irma“ in der Nähe der Karibischen Inseln. Er fegte über Kuba und weitere Karibikinseln hinweg, bevor er die Südspitze Floridas erreichte (*Abbildung*). Dabei wurden Windgeschwindigkeiten von über 285 Kilometer pro Stunde gemessen.⁰⁴ Der Versuch, Irma ohne Satellitenbeobachtungen vorherzusagen, hätte nur den Hinweis auf eine sehr schwache, westwärts über den Atlantik ziehende atmosphärische Störung erbracht. Nichts hätte auf die Entwicklung eines ausgewachsenen Tropenzyklons hingedeutet,⁰⁵ denn die Messung einer verstärkten Konvektionsaktivität, in diesem Fall die für tropische Wirbelstürme charakteristische Zirkulationsströmung, erfordert Luftfeuchtigkeitsdaten aus einer Höhe von ungefähr 3000 Metern.

Die globalen Messungen haben dem EZMW eine Vorhersage der Zyklonogenese von Irma mit einer Woche Vorlauf ermöglicht, anhand des entsprechenden Modells konnte zudem etwa fünf bis sieben Tage vorher angegeben werden, welche Inseln und Küstengebiete betroffen sein würden, was noch vor wenigen Jahrzehnten unmöglich gewesen wäre. Es gelang dagegen nicht, die Zyklonstärke richtig vorherzusagen. Dies lässt sich zumindest teilweise dadurch erklären, dass die Planquadrate, in die Meteorologen des EZMW die Erde aufgeteilt haben, noch nicht klein genug sind, um bestimmte Eigenschaften von Tropenzyklonen richtig vorher zusagen.

Die Modellauflösung bildet die Berechnungsgrundlage für die Wettergleichungen und hat großen Einfluss auf die Qualität der Wettervorhersage. Dabei wird zwischen der vertikalen und der horizontalen Auflösung unterschieden. Die ver-

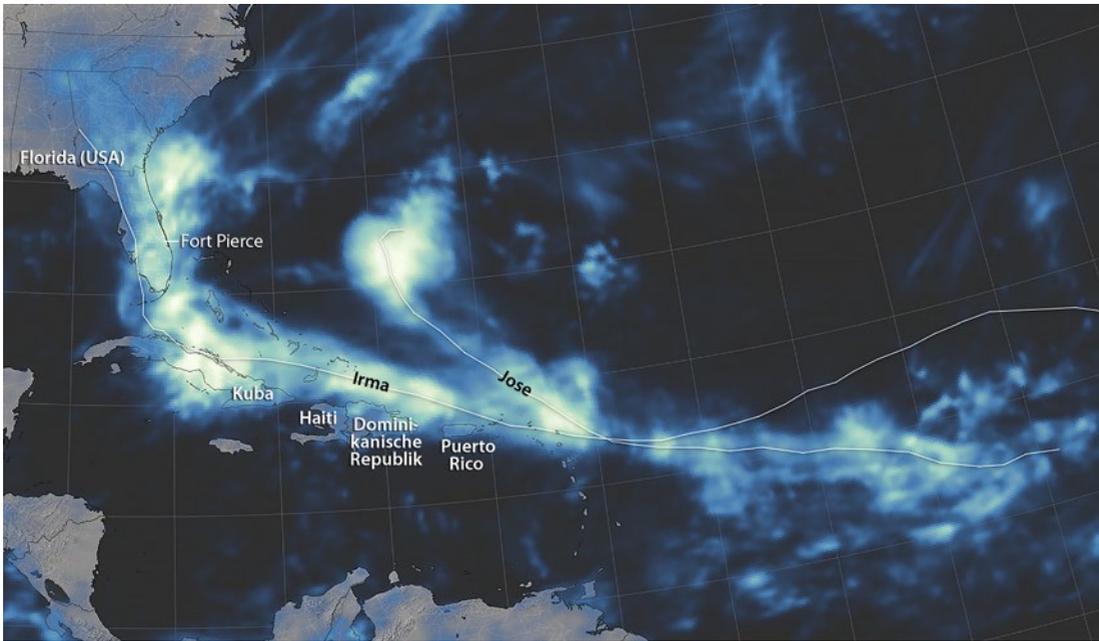
01 Presse und Informationsamt der Bundesregierung, Klimaschutzprogramm 2030, 9.10.2019, www.bundesregierung.de/breg-de/themen/klimaschutz/klimaschutzprogramm-2030-1673578. 2018 betrug der Anteil erneuerbarer Energien rund 38 Prozent, vgl. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, Erneuerbare Energien, 2019, www.bmwi.de/Redaktion/DE/Dossier/erneuerbare-energien.html. Im Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) ist derzeit noch ein Anteil von 55 bis 60 Prozent für das Jahr 2035 festgeschrieben, vgl. EEG vom 21.7.2014 (BGBl. I S. 1066), das zuletzt durch Artikel 5 des Gesetzes vom 13.5.2019 (BGBl. I S. 706) geändert worden ist.

02 Vgl. Jennifer Collins, After a Year of Record Droughts, Germany's Meteorological Office Sets up Early Warning System, 26.3.2019, www.dw.com/en/a-48062197; Drittwärmster Sommer seit 1881, 30.8.2019, www.tagesschau.de/inland/sommer-bilanz-101.html.

03 Vgl. Peter Bauer/Alan Thorpe/Gilbert Brunet, The Quiet Revolution of Numerical Weather Prediction, in: *Nature* 7567/2015, S. 47–55.

04 Vgl. Linus Magnusson/Ivan Tsonevsky/Fernando Prates, Predictions of Tropical Cyclones Harvey and Irma, EZMW Newsletter 153, Oktober 2017, www.ecmwf.int/en/newsletter/153/news-predictions-tropical-cyclones-harvey-and-irma; Deutscher Wetterdienst (DWD), Dreifaches Ungemach – Irma, Jose und Katia, 8.9.2017, www.dwd.de/DE/wetter/thema_des_tages/2017/9/8.html.

05 Vgl. Dieter K. Klaes, Remote Sensing of Weather, Climate, and Environment, Conference Presentation, Society of Photo Optical Instrumentation Engineers (SPIE), 11.9.2018, www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/10764/1076402/Remote-sensing-of-weather-climate-and-environment-Conference-Presentation/10.1117/12.2323929.full.



Verlauf der Tropenzyklone Jose und Irma sowie satellitenbasierte Niederschlagsmessungen vom 5. bis zum 12. September 2017
 Quelle: NASA Earth Observatory image/Joshua Stevens (eigene Beschriftung).

tionale Auflösung teilt die Atmosphäre senkrecht in Ebenen auf, die horizontale gibt die Größe der Gitterzelle an. Ein globales Prognosemodell wie das numerische System des EZMW arbeitet beispielsweise heute mit bis zu 128 vertikalen Ebenen, während es in den 1980er Jahren noch 16 Ebenen waren. Die höchste horizontale Auflösung für die Prognosen des EZMW beträgt derzeit etwa 9 Kilometer, in den 1990er Jahren waren es 300 Kilometer. Die erheblichen wissenschaftlichen und technischen Anstrengungen zur Entwicklung eines höher aufgelösten Modells haben beispielsweise Überschwemmungsprognosen deutlich verbessert.

Wie wichtig der Schritt zu einer höheren Auflösung ist, lässt sich auch an der Topografie veranschaulichen. Durch diese wird die atmosphärische Strömung gesteuert und blockiert sowie die Niederschlags- und Einwirkungstemperatur erhöht, die zentral für die Stärke von Wetterphänomenen wie dem Föhnwind ist. Bei einer Gittergröße von 300 mal 300 Kilometern läge der höchste Punkt in den Alpen bei 906 Metern, bei einer Größe von 9 mal 9 Kilometern sind es 3063 Meter.

Neben der Modellauflösung spielen auch Verbesserungen in der mathematischen Erfassung physikalischer Prozesse eine wichtige Rolle. Die Erhöhung der Modellauflösung muss mit einer Verbesserung der Modellphysik einherge-

hen, um die Prognosen für verheerende Ereignisse wie Hochwasser spürbar zu verbessern. So sind extrem hohe Niederschläge und Sturzfluten weltweit für etwa 85 Prozent der Überschwemmungen verantwortlich, insbesondere Sturzfluten jedoch auf kleine Gebiete und kurze Zeiträume beschränkt, was die Vorhersage besonders schwierig macht.⁰⁶

Sturzfluten werden oft durch eine Abfolge mehrerer Gewitter erzeugt, die zu einer tiefen, feuchten Konvektion führen: Feuchte Luft steigt als Reaktion auf Instabilitäten in der Atmosphäre auf. Da globale Modelle mit der aktuellen Gittergröße von 9 Kilometern diese kleinräumige Konvektion nicht simulieren können, wird diese oft in einem Schema abgebildet, das auf Basis empirisch herleitbarer Parameter näherungsweise den vertikalen Massentransport in jeder Gitterzelle erfasst. Höher auflösende Modelle oder Modelle mit Konvektionskomponente kommen ohne diese Parametrisierung aus.⁰⁷ Durch diese „Nowcasts“

06 Vgl. Konstantine P. Georgakakos, Overview of the Global Flash Flood Guidance System and Its Application Worldwide, WMO Bulletin 1/2018, S. 37–42.

07 Vgl. Peter Clark et al., Convection-Permitting Models: a Step-Change in Rainfall Forecasting, in: Meteorological Applications 2/2016, S. 165–181.

lässt sich die Atmosphärenkonvektion mit ausreichender Genauigkeit abbilden und lassen sich so der Niederschlag und die Bewölkung entsprechend besser prognostizieren, was bei der Vorhersage einzelner Stürme und anderer kleinräumiger Ereignisse zu zuverlässigeren Ergebnissen führt als im Falle von numerischen Wettermodellen. Da die Veröffentlichung abweichender Prognosen durch Warndienste zu Irritationen in der Öffentlichkeit führen könnte, hat beispielsweise der Deutsche Wetterdienst (DWD) mit dem integrierten Vorhersagesystem „Sinfony“ ein Pilotprojekt ins Leben gerufen, das die Prognosemodelle zusammenführen soll.⁰⁸

Eine weitere Möglichkeit zur Verbesserung der Niederschlagsprognose bietet das Maschinelle Lernen (ML). Dabei werden Archivprognosen und Fehlerstatistiken mit den tatsächlichen Messungen verglichen. ML, das mittlerweile auch von vielen kommerziellen Anbietern genutzt wird, eignet sich prinzipiell für jedes Wettermerkmal, beispielsweise zur Prognose der Temperatur, Windgeschwindigkeit oder Bewölkung. Die meisten Verfahren nutzen Prognosen von mehreren Zentren als Input, da die Differenzen eine bessere Ergebnisbandbreite erlauben. Ein bestimmtes Vorhersagemodell mag im Durchschnitt anderen überlegen sein, doch die Tagesqualität der Modelle ist variabel und auch vom Zielgebiet abhängig. So unterscheidet sich die Ensemblemethode der Nationalen Ozean- und Atmosphärenbehörde der Vereinigten Staaten von der Methode des EZMW. In ML-Verfahren kann von diesen Differenzen oder individuellen systematischen Fehlern profitiert werden, indem historische Datensätze analysiert und bestimmte Prognosen, die im Durchschnitt besser abschneiden als andere, höher gewichtet werden.

Viele Wetter-Apps nutzen ML für ihre Vorhersagen, die deutlich besser sind als rohe Modellausgabedaten. Diese Verfahren sind, wie durch das Europäische Hochwasserwarnsystem im Oktober 2007 bei den Überschwemmungen in Rumänien gezeigt wurde,⁰⁹ für die Hochwas-

servorhersage geeignet. Mit dem Point-Rainfall-Projekt des EZMW und den Model-Output-Statistics-Verfahren des DWD existieren zwei weitere auf ML basierende Modelle, die unter anderem unterschiedliche Prognosemodelle, Boden- und Radarmessungen und Blitz einschläge statistisch kombinieren, um so Sturzfluten vorherzusagen.¹⁰ ML wäre auch bei der Prognose von Merkmalen wie der Windstärke, Wellenlänge, Wasserqualität und Humangesundheit sehr nützlich.

ZUKUNFTSPERSPEKTIVEN

Die Qualität der numerischen Wettervorhersage wird sich weiter verbessern. Das EZMW hat sich beispielsweise das Ziel gesetzt, Wetterereignisse wie Extremniederschläge mit zwei Wochen Vorlauf (statt aktuell einer Woche) und großräumige Wetterphänomene beziehungsweise Änderungen der Großwetterlage, die insbesondere mit Blick auf Hitzewellen und Dürren wichtig sind, mit vier Wochen Vorlauf (statt aktuell zwei Wochen) vorherzusagen. Auf globaler Ebene sollten Vorhersagen für großräumige Anomalien wie La Niña oder El Niño, die durch periodische Änderungen der Meeresoberflächentemperatur des äquatornahen Pazifiks alle drei bis sieben Jahre das Wetter auf der ganzen Welt beeinflussen und stets von Naturkatastrophen begleitet werden, bis zu einem Jahr im Voraus (statt aktuell sechs bis neun Monaten) getroffen werden können. Der Erfolg hängt allerdings von Fortschritten in mehreren Bereichen ab.

Modellierung der Erde

Ältere numerische Wettervorhersagesysteme konzentrierten sich weitgehend auf die Modellierung der Atmosphäre. Bei dieser Konzentration auf die Atmosphäre wurden unter anderem die Auswirkungen von Aerosolen vernachlässigt. Diese festen oder flüssigen Partikel können – je nach chemischer Zusammensetzung – beispielsweise die Sonnenstrahlung reflektieren

⁰⁸ Siehe www.dwd.de/DE/forschung/forschungsprogramme/sinfony_iafe/sinfony.html.

⁰⁹ Vgl. Florian Pappenberger et al., New Dimensions in Early Flood Warning Across the Globe Using Grand-Ensemble Weather Predictions, in: *Geophysical Research Letters* 10/2008, <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1029/2008GL033837>.

¹⁰ Vgl. Fatima Pillosu/Tim Hewson, New Point-Rainfall Forecasts for Flash Flood Prediction, EZMW Newsletter 153, Oktober 2017, www.ecmwf.int/en/newsletter/153/news/new-point-rainfall-forecasts-flash-flood-prediction; DWD, Model Output Statistics (MOS), www.dwd.de/DE/leistungen/met_verfahren_mosmix/mosmix_verfahrenbeschreibung.pdf?__blob=publicationFile&v=4.

und absorbieren, was wiederum Wärmeverteilung in der Atmosphäre verändern oder die Photosynthese beeinflussen kann. Zudem wurden Ozeane und Landflächen als nahezu konstante Größen behandelt. Das Geosystem ist jedoch vielschichtiger. Die Komponenten – Ozeane, Landoberflächen, Meereis, Atmosphäre, Biosphäre und der Mensch – interagieren auf komplexe Weise. Es lässt sich bereits nachweisen, wie die direkte Kopplung der Ozeane an die Atmosphärenmodelle die Vorhersagen für mittlere Zeiträume und für Jahreszeiten verbessern kann.¹¹ Eine weitere Verbesserung der numerischen Vorhersage muss die Wechselwirkungen sämtlicher Komponenten des Geosystems ausreichend komplex abbilden können. Das erfordert verstärkte Anstrengungen zur besseren Repräsentation der Geophysik. Insbesondere ist die zusätzliche Aufnahme einer Reihe natürlicher Faktoren notwendig. So sollten Abbrüche von Eisbergen, Auenwaldüberschwemmungen oder die Entwicklung des Küstenschelfe, aber ebenso die Auswirkungen des städtischen Autoverkehrs und der bebauten Umwelt auf die Atmosphäre stärker in die Modellierung der Erde integriert werden. Das erfordert Milliarden zusätzlicher Messungen für die Datenassimilation.

Informatik und Skalierbarkeit

Die weitere Verbesserung der Wettervorhersage ist eng an eine Steigerung der Rechenleistung geknüpft. Jede spürbare Prognoseverbesserung hängt ganz wesentlich von der Verfügbarkeit geeigneter Hochleistungsrechner und Datenverarbeitungssysteme ab. Da sich die Fortschritte in der Rechentechnik zu verlangsamen scheinen, die Vorhersagesysteme zugleich aber weiterhin komplexer werden, dürften sich künftige Prognoseverbesserungen kaum noch auf die heutige Art und Weise erzielen lassen. Insbesondere der Energiebedarf könnte zu einer problematischen Größe werden, da es mit der aktuellen Computerarchitektur bald unmöglich sein wird, Prognosen zu angemessenen Kosten abzugeben. Das macht neue Konzepte für die numerische Wet-

¹¹ Vgl. Linus Magnusson et al., ECMWF Activities for Improved Hurricane Forecasts, in: Bulletin of the American Meteorological Society 3/2019, S. 445–457, hier S. 453f., <https://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10.1175/BAMS-D-18-0044.1>.

tervorhersage erforderlich. Weitere Prognoseverbesserungen werden weniger von der Steigerung der Einzelprozessorleistung erwartet, sondern eher vom massenhaften Einsatz von Spezialprozessoren. Dieser Paradigmenwechsel erfordert ein komplettes Umdenken in der numerischen Wettervorhersage.

Bei manchen Wettervorhersagemodellen und anderen numerischen Systemen wurde dieser Schritt bereits gemacht und ihre Rechenpower verstärkt auf Grafikprozessoren gestützt. Künftige Exascale-Computersysteme werden verstärkt auf das Zusammenwirken unterschiedlicher Disziplinen angewiesen sein. Kooperationen zwischen Wettermodellentwicklern, Informatikern und Hardwareanbietern sind daher notwendig, damit die numerische Wettervorhersage von den weiteren Fortschritten in der Rechentechnik profitieren kann.¹² Zu den vielen spannenden Möglichkeiten, die sich künftig bieten werden, gehört zudem insbesondere das noch junge Quantencomputing.

Maschinelles Lernen und Künstliche Intelligenz (KI)

ML und KI haben sich in vielen Bereichen als effizienter erwiesen als der Mensch. Ihre Fähigkeit zur Wissensextraktion aus komplexen, umfangreichen Datenbeständen – das aktuelle EZMW-Archiv hat einen Umfang von 466 Petabyte, was etwa 60 Millionen Spielfilmen entspricht – macht sie besonders geeignet für die numerische Wettervorhersage. Darüber hinaus können solche Verfahren eine Rolle bei der Vorbereitung von Beobachtungen, der Optimierung von Arbeitsabläufen und der Modellierung komplexer physikalischer Prozesse spielen und somit die Berechnungen beschleunigen. Die Verfahren kommen bereits zum Einsatz, um die Reaktion des menschlichen Körpers auf atmosphärische Bedingungen zu modellieren¹³ und um Bodenfeuchtekurven in der Datenassimilation zu schät-

¹² Vgl. Philipp Neumann et al., Assessing the Scales in Numerical Weather and Climate Predictions: Will Exascale Be the Rescue?, in: Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences 2142/2019, <https://royalsocietypublishing.org/doi/pdf/10.1098/rsta.2018.0148>.

¹³ Vgl. Claudia Di Napoli/Florian Pappenberger/Hannah L. Cloke, Verification of Heat Stress Thresholds for a Health-Based Heat-Wave Definition, in: Journal of Applied Meteorology and Climatology 6/2019, S. 1177–1194.

zen.¹⁴ Die Verfahren und ihre praktische Anwendung stehen noch am Anfang, zeigen aber schon jetzt großes Potenzial. Zugleich wird anhand des spektakulären Aufstiegs der KI die Rolle des Meteorologen hinterfragt, was Anpassungen erforderlich machen könnte, da viele Aufgaben, die heute per Hand von einem Menschen durchgeführt werden, in der Zukunft automatisiert erledigt werden.

Internet der Dinge

Die numerische Wettervorhersage ist eine ausgesprochen datenhungrige Fachrichtung. Als Faustregel gilt: Je mehr Daten, desto besser die Prognose – denn die Messdaten sind ausschlaggebend für die Festlegung der Anfangsbedingungen des Geomodells. Üblicherweise stammen die Messungen von einer begrenzten Anzahl von Quellen, und insbesondere für Vor-Ort-Beobachtungen sind nur relativ wenige Messdaten verfügbar. Das dürfte sich bald ändern. Moderne Smartphones können Luftdruck und Temperatur messen, immer mehr Wetterbegeisterte haben sich eigene preiswerte Wetterstationen gebaut, moderne Autos können bestimmte Umgebungsdaten wie die Vereisung von Straßen messen und aus der Geschwindigkeit von Scheibenwischern lässt sich die Niederschlagsmenge ableiten.¹⁵

Diese Daten finden allmählich Eingang in die Wettervorhersage. So übernimmt der norwegische Wetterdienst seit kurzem Messungen aus einem Bürgerbeobachtungsnetz und konnte dadurch die Vorhersagegüte für bodennahe Temperaturen deutlich steigern.¹⁶ Die Umweltdaten, die zunehmend über das Internet der Dinge bereitgestellt werden (können), bilden die Grundlage für die nächste „stille Revolution“ in der Wettervorhersage. Sie wird unseren All-

tag noch sicherer machen – unabhängig davon, ob es um die Entscheidung für oder gegen einen Regenschirm, um die Nutzung von Windenergie oder die Prävention von Hochwasserkatastrophen geht.

FLORIAN PAPPENBERGER

ist Direktor des Geschäftsbereichs Vorhersagen am Europäischen Zentrum für mittelfristige Wettervorhersagen (EZMW).

florian.pappenberger@ecmwf.int

HANNAH L. CLOKE

ist Professorin für Hydrologie an der University of Reading in Großbritannien und der Uppsala University in Schweden.

h.l.cloke@reading.ac.uk

APuZ-
Newsletter
abonnieren
www.bpb.de/newsletter

Der Newsletter informiert Sie etwa 30 mal im Jahr per E-Mail über die Beiträge der aktuellen Ausgabe sowie über kommende Themenschwerpunkte, den jährlichen „Call for Papers“ und Veranstaltungen.

¹⁴ Vgl. Nemesio Rodríguez-Fernández et al., SMOS Neural Network Soil Moisture Data Assimilation in a Land Surface Model and Atmospheric Impact, in: Remote Sensing 11/2019, www.mdpi.com/2072-4292/11/11/1334.

¹⁵ Vgl. Ehsan Rabiei et al., Rainfall Estimation Using Moving Cars as Rain Gauges – Laboratory Experiments, in: Hydrology and Earth System Science 11/2013, S. 4701–4712.

¹⁶ Vgl. Thomas N. Nipen et al., Adopting Citizen Observations in Operational Weather Prediction, in: Bulletin of the American Meteorological Society, Early Online Release, 2. 10. 2019, <https://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/BAMS-D-18-0237.1?mobileUi=0>.

WETTER IM WANDEL

Wie der Klimawandel unser Wetter der Zukunft beeinflusst

Kai Kornhuber

Die unmittelbare Erfahrbarkeit und der Einfluss auf den menschlichen Alltag machen das Wetter nicht nur zum sprichwörtlichen Eisbrecher eingefrorener Kommunikation, die Beobachtung, Aufzeichnung und Vorhersage von Wetter beschäftigen die Menschen schon weitaus länger als es die Meteorologie als empirische Wissenschaft gibt. Das wissenschaftliche Verständnis von „Wetter“ – definiert als momentaner Zustand der Atmosphäre – ist daher von einem starken menschlichen Bezug geprägt: Wetter wird gemeinhin hergeleitet durch die Faktoren, die wir auf der Erdoberfläche erleben (können), insbesondere die Windstärke in Bodennähe, Lufttemperatur und -feuchtigkeit, Wolkenform und Sonnenbedeckung sowie Menge und Form des Niederschlags. In Nordamerika, Europa und dem nördlichen Asien wechseln Wetterbedingungen für gewöhnlich innerhalb von Tagen. Hoch- und Tiefdruckgebiete von nahezu kontinentaler Ausbreitung werden von starken Winden der oberen Troposphäre, also in Höhen von etwa zehn Kilometern über der Erdoberfläche, meist von West nach Ost verlagert – eine Dynamik, die als Jetstream bekannt ist. Die atmosphärische Zirkulation ist freilich ein chaotisches System, dessen Anfangsbedingungen man nur zu einem gewissen Maß an Genauigkeit kennt und in dem kleinste Störungen große Auswirkungen haben können. Die Vorhersagbarkeit des täglichen Wetters ist daher auf etwa zwei Wochen begrenzt.

Über diesen Zeitraum hinaus kann man sich auf einige Gewissheiten stützen, die sich aus Alltagserfahrungen und Messungen ergeben, etwa darauf, dass es in den Sommermonaten wärmer als im Winter und auf einem Berg meist kälter als im Tal ist, oder darauf, dass es wärmer wird, je näher man den Tropen kommt. Hier kommt der Begriff des „Klimas“ ins Spiel, der orts- und zeitgebundenen Statistik des Wetters. Diese basiert auf langen Messreihen unterschiedlicher Wetterdienste, definiert durch statistische Größen wie Mittelwert und Variabilität. Der von der Weltorganisation für

Meteorologie (WMO) standardisierte Zeitraum, durch den das Klima einer Region festgelegt wird, beträgt 30 Jahre. Da auf solchen Zeitskalen die physikalischen Randbedingungen, beispielsweise der Kohlenstoffanteil in der Atmosphäre, relevante Prozesse dominieren, können Aussagen über die Entwicklung des Klimas über längere Zeitspannen getroffen werden als über das Wetter. Steht die Entwicklung der Randbedingungen fest, geben uns Projektionen mit Klimamodellen einen zuverlässigen Einblick in das Klima zukünftiger Jahrzehnte bis Jahrhunderte, doch dazu später mehr.

Ein über Jahrzehnte ermitteltes regionales Klima gibt eine Orientierung für das, was gemeinhin als saisonal angebrachtes Wetter gilt. Auf dieses verlassen wir uns beispielsweise, wenn wir unser Gepäck mit Sandalen, Shorts und Sonnencreme für den Mittelmeerurlaub ausstatten oder zur winterlichen Skiwandertour Handschuhe, Winterjacke und Wollmütze einpacken. Klima, Wetter und menschliches Verhalten sind auf diese Weise untrennbar verbunden. Wie sehr diese Verbindung aber nicht nur unseren Alltag beeinflusst, sondern auch prägend für unsere Vergangenheit war und für unsere Zukunft sein kann, soll im Folgenden verdeutlicht werden.

METEOROLOGISCHE UND KLIMATOLOGISCHE MESSUNGEN

Das Klima als Mittelwert und Taktgeber des Wetters ist weder stationär noch ewig konstant. So wissen wir von der Existenz vergangener Warm- und Eiszeiten, in denen menschliches Leben noch nicht existierte und klimatische Bedingungen herrschten, die eine andere Tier- und Pflanzenwelt ermöglichten. Substantielles Wissen über Klimabedingungen der Vergangenheit erhalten wir zunächst aus Messreihen und Wetteraufzeichnungen. Verglichen mit erdgeschichtlichen Zeitskalen reichen diese nicht allzu weit in die Vergangenheit

zurück. Die längsten ununterbrochenen Messreihen gehen bis in die Anfänge des 18. Jahrhunderts, wie beispielsweise die Temperaturmessreihe der niederländischen Gemeinde De Bilt. Die längste verfügbare Temperaturzeitreihe Deutschlands begann ab 1719 in der Region um Berlin. Damit Messungen für die aktuelle Forschung verwendbar sind, müssen diese idealerweise unter gleichen und gut dokumentierten Bedingungen angefertigt werden. Als erste Initiative dieser Art gilt die Zeitreihe vom bayerischen Hohenpeißenberg, beginnend im Jahr 1781, die im Rahmen eines internationalen Messnetzes initiiert wurde und auf einheitlichen Messbedingungen und -methoden beruht.⁰¹

Jenseits der Landflächen können beispielsweise Logbücher alter Handelsschiffe Quelle wichtiger Informationen über die Wetterbedingungen unseres „blauen Planeten“ sein. Diese Aufzeichnungen zu einem kohärenten und wissenschaftlich nutzbaren Katalog zusammenzutragen und zu digitalisieren, ist ein ebenso mühsames wie wichtiges Großprojekt, das nicht nur die interdisziplinäre Zusammenarbeit von Historikern, Archivaren und Klimawissenschaftlern erfordert, sondern auch vom freiwilligen Engagement interessierter Bürger profitieren kann.⁰²

Im Verlauf des Industriezeitalters verdichtete sich das Netz globaler Aufzeichnungen. Die Wetterbedingungen gut – oder zumindest besser als jemand anderes – zu kennen, wurde mit der aufkommenden Luftfahrt nicht nur in beiden Weltkriegen, sondern auch aus ökonomischer Perspektive relevant.⁰³ Die Verwendung von Wetterballons erlaubte Messungen bis hoch in die Atmosphäre hinein, was erste Erkenntnisse über die Zusammenhänge der globalen Zirkulation ermöglichte. Die aufsteigenden Messgeräte nutzte beispielsweise der japanische Meteorologe Wasaburo Ooishi, der seine Erkenntnisse 1926 veröffentlichte und als einer der Entdecker des Jetstreams

gilt.⁰⁴ Seit den 1970er Jahren werden zudem meteorologische Bodenstationen von Wettersatelliten komplementiert und, da die Betreibung der Bodenstationen recht kostspielig ist, zum Teil abgelöst. Daher sinkt seit mehreren Jahrzehnten die Anzahl an meteorologischen Bodenstationen. Satellitenmessungen erlauben zwar eine nahezu lückenlose Dokumentation der globalen Wetterbedingungen, um die Richtigkeit ihrer Messungen sicherzustellen, bleiben jedoch ortsfeste Bodenmessungen zur Kontrolle unabdingbar. Die gesammelten Daten werden in computergestützten mathematischen Modellen aufbereitet, die dann von Wissenschaftlern ausgewertet, analysiert und – beispielsweise vom US-amerikanischen Amt für Ozean- und Atmosphärenforschung oder vom Europäischen Zentrum für mittelfristige Wettervorhersagen – für Modelle der Wetterprognose genutzt werden können.⁰⁵

Woher aber stammt nun unser Wissen über klimatische Bedingungen vor Zeiten systematischer Wetteraufzeichnungen? Stetiges Wetter, also Klima, beeinflusst seine Umwelt und hinterlässt Spuren in Gestein, Eis, Tier- und Pflanzenwelt, sogenannte *proxies* (Stellvertreter). Paläoklimatologen suchen nach diesen indirekten Spuren vergangener Klimaverhältnisse und rekonstruieren auf dieser Grundlage die Klimabedingungen vergangener Jahrtausende. So wird beispielsweise das Pflanzenwachstum durch regenreiche, warme Sommer meist angeregt. Wenn also Baumstämme Jahrhunderte überdauern, weil sie luftdicht im Schlick eingelagert wurden, dann kann man anhand ihrer Wachstumsringe auf Niederschlagsmenge und Temperatur schließen – und so letztlich auf vergangene Klimabedingungen.

Klimatologisch hochspannende Quellen weiterer *proxies* sind die Eisanzer Grönlands und der Antarktis. Diese werden von wiederkehrend fallendem Schnee genährt, der unter dem Druck nachkommender Schneeschichten langsam zu Eis gepresst wird. Je tiefer man also in den Eisanzer hervordringt, desto älter wird das Eis, das man vorfindet – und desto weiter reist man in der Zeit zurück. Dass man dieses Potenzial klimatologisch nutzen kann, soll, so eine gern erzählte Anekdote,

01 Vgl. Deutscher Wetterdienst (DWD), Klimadaten. Wann wurde mit regelmäßigen und verlässlichen Wetteraufzeichnungen begonnen?, o. D., www.dwd.de/SharedDocs/faqs/DE/klima_faqs/faq_russell/klimadaten_1.html.

02 Siehe z. B. Earliest UK Weather Records Could Hold Key to Predicting Future Climate, 25. 2. 2019, www.reading.ac.uk/news-and-events/releases/PR794027.aspx.

03 Vgl. Paul N. Edwards, *A Vast Machine. Computer Models, Climate Data, and the Politics of Global Warming*, Cambridge-London 2019.

04 Vgl. John M. Lewis, Ooishi's Observation. Viewed in the Context of Jet Stream Discovery, in: *Bulletin of the American Meteorological Society* 3/2003, S. 357–370, hier S. 363 ff.

05 Siehe auch den Beitrag von Florian Pappenberger und Hannah L. Cloke in dieser Ausgabe (*Anm. d. Red.*).

in den 1960er Jahren dem französischen Wissenschaftler Claude Lorius beim Beobachten austretender Luftblasen aus den schmelzenden Eiswürfeln seines Whiskeys bewusst geworden sein.⁰⁶ In den vergangenen Jahrzehnten wurden wiederholt Eisbohrkerne entnommen und in Laboren Schicht um Schicht geschmolzen, um die austretenden Gase zu analysieren.

Von besonderem Interesse sind die im Eis eingeschlossenen jahrtausendealten Luftbläschen dabei, weil man anhand ihrer chemischen Komposition Informationen über vergangene Klimabedingungen gewinnen kann. So hängt das Verhältnis von Sauerstoff-16-Isotopen zu Sauerstoff-18-Isotopen linear von der Umgebungstemperatur ab. Kann man mittels der Luftbläschen dieses Verhältnis bestimmen, lassen sich also Rückschlüsse auf die damalige Umgebungstemperatur und letztlich auch auf die globalen Temperaturen ziehen.⁰⁷ Die beispielsweise im Rahmen der Antarktis-Expeditionen von Claude Lorius entnommenen Eiskerne liefern so Informationen über die globale Mitteltemperatur vergangener Jahrhunderte und Jahrtausende.⁰⁸ Zudem lässt sich die Konzentration anderer Moleküle wie Kohlenstoffdioxid bestimmen. Die längsten Zeitreihen, die auf Basis dieser eisigen Zeitzeugen rekonstruiert werden können, reichen bis zu 123 000 Jahre in Grönland und bis zu 800 000 Jahre in der Antarktis in die Vergangenheit.⁰⁹

Auch durch die Auswertung dieser Zeitreihen wissen wir, dass sich das Klima seit Beginn der Industrialisierung rapide verändert. Vergleicht man den Zeitraum der vergangenen 150 Jahre mit dem restlichen Holozän, dem Erdzeitalter, das vor etwa 12 000 Jahren begann und dessen klimatische Stabilität zur zivilisatorischen Entwicklung maßgeblich beigetragen hat, so steigen Temperaturen momentan schneller als jemals zuvor. In jüngerer Zeit rücken insbesondere mehr oder weniger subtil wahrgenommene Abweichungen vom gewohnten Wetter den Klimawandel, der vor allem durch eine globale Erwärmung bemerkbar wird,

ins tägliche Bewusstsein: Immer häufiger treten Hitzerekorde auf, lassen sich sowohl Dürren als auch Überschwemmungen durch Starkregen feststellen oder bleibt im Winter der Schnee aus. Welche Abweichungen vom „gewöhnlichen“ Wetter aber lassen sich durch natürliche Schwankungen erklären, bei welchen lässt sich ein Einfluss des Klimawandels nachweisen?

NATÜRLICHER UND ANTHROPOGENER KLIMAWANDEL

Klimatische Bedingungen haben sich schon immer gewandelt. Schauen wir in die Vergangenheit, so lassen sich diese Schwankungen oft durch natürliche, also nicht vom Menschen angestoßene Prozesse erklären. Die Atmosphäre steht dabei in ständiger Wechselwirkung mit den übrigen Komponenten des Klimasystems: den Ozeanen, Seen und Flüssen, den Wäldern und Pflanzen, den Landflächen und Gesteinen sowie dem Meereis und den Gletschern.¹⁰ Diese Wechselwirkungen sind vielfältig und verlaufen oft zyklisch. In Abhängigkeit von den involvierten chemischen und physikalischen Prozessen zeigen sich Zyklen auf unterschiedlichen Zeitskalen, die zwischen Jahren bis hin zu Jahrtausenden variieren und sich gegenseitig überlagern.

Das wohl prominenteste Beispiel natürlicher Variabilität ist die „El Niño Southern Oscillation“ (ENSO), das übergeordnete Muster der sogenannten El-Niño-Ereignisse. Die Temperatur des pazifischen Ozeans westlich von Zentralamerika variiert unregelmäßig in einem Rhythmus von zwei bis sieben Jahren zwischen El-Niño- und La-Niña-Phasen. Bei El Niño ist der äquatornahe Ostpazifik besonders warm, bei La Niña dagegen besonders kalt. Durch Wechselwirkungen des Ozeans mit der Atmosphäre hat dies Auswirkungen über die betreffende Region hinaus. So sind El Niño und La Niña je nach Region meist mit erhöhtem oder verringertem Niederschlag und Sturmaufkommen verbunden. Im Falle von El Niño ist zum Beispiel die Niederschlagsmenge im Südwesten Südamerikas – insbesondere westlich der Anden, an denen Wolken meist abregnen – oft besonders hoch, im Nordosten dagegen be-

06 Vgl. Roland Knauer, *Einen Whisky on the Rocks aufs Klima*, 27. 11. 2015, www.faz.net/-13934254.html.

07 Vgl. Holli Riebeek, *Paleoclimatology: The Oxygen Balance*, 6. 5. 2005, https://earthobservatory.nasa.gov/features/Paleoclimatology_OxygenBalance.

08 Vgl. *Ice Cores and Climate Change*, 1. 3. 2014, www.bas.ac.uk/data/our-data/publication/ice-cores-and-climate-change.

09 Vgl. Tim Staeger, *Klimaarchive im ewigen Eis*, 5. 12. 2018, <https://wetter.tagesschau.de/wetterthema/2018/12/05/klimaarchive-im-ewigen-eis.html>.

10 Vgl. Hannah Hüging, *Wetter, Klima und Klimawandel*, 31. 5. 2013, www.bpb.de/38427; Stefan Rahmstorf/Hans Joachim Schnellhuber, *Der Klimawandel. Diagnose, Prognose, Therapie*, München 2018.

sonders niedrig.¹¹ El-Niño-Perioden sind zudem mit einer weltweit erhöhten Mitteltemperatur verknüpft.¹²

Während der etwa elfjährige Zyklus der Sonnenaktivität, messbar insbesondere anhand der Anzahl und Größe von „Sonnenflecken“, vermutlich geringen Einfluss auf Wetterbedingungen hat,¹³ haben Variationen der eintreffenden Strahlung auf der Erde über längere Zeitskalen durch sogenannte Milanković-Zyklen großen Einfluss auf globale Klimabedingungen. Diese Variationen können sich ergeben, da aufgrund von Anziehungskräften zwischen weiteren Himmelskörpern und der Erde die Umlaufbahn unseres Planeten um die Sonne nicht gleichmäßig verläuft. Sie variiert, ebenso wie sich die Neigung und relative Position der Erdrotationsachse gegenüber der Sonne über Zeiträume von etwa 25 000 bis 100 000 Jahren verändern.¹⁴ Die in den langen Temperaturzeitreihen verzeichneten Warm- und Eiszeiten können zu einem großen Anteil durch die Überlagerungen dieser Zyklen erklärt werden. Sowohl der Abstand zur Sonne als auch die Neigung der Erde zur Sonne beeinflussen über Phasenabhängigkeit der eintreffenden Sonnenstrahlen die Erdtemperatur. Eiszeiten bilden sich daher vermehrt, wenn sich die kalten Phasen der Zyklen überlagern.

Ein weiteres Beispiel für natürliche, jedoch nicht zyklische Einflussfaktoren sind Vulkanausbrüche. Diese katapultieren Staubpartikel bis in die oberen Schichten der Atmosphäre, wo sie innerhalb weniger Tage über das globale Windsystem gleichmäßig verteilt werden. Wärmende Sonnenstrahlen werden so effizient abgeschirmt. Die massiven Eruptionen des Pinatubo auf den Philippinen (1991) oder des mexikanischen El Chichón (1982) hatten einen messbaren Effekt auf das Klima mit weltweit kühleren Temperaturen in den nachfolgenden Jahren. Diese Temperatureinbrüche können drastische Folgen haben, was an dieser Stelle am Beispiel des Jahres 1816 verdeutlicht

werden soll. Dieses ging als „Jahr ohne Sommer“ in die Geschichtsbücher ein und war von außergewöhnlich kühlen Temperaturen gekennzeichnet, was zu Missernten und Erfrierungstoten insbesondere in Nordamerika und Europa führte. Während es damals aufgrund fehlender Messdaten und einem begrenzten Verständnis für das globale Klimasystem keine Erklärung für diese Klimaanomalie gab, gilt mittlerweile der Ausbruch des Vulkans Tambora auf Indonesien im Jahr zuvor als wahrscheinlichste Ursache. Durch diesen wurde die Sonne sprichwörtlich verdunkelt, die als externer Faktor die wohl bedeutendste Rolle für unser Klima einnimmt.

Neben diesen Faktoren ist auch die chemische Zusammensetzung der Atmosphäre wichtig für das Erdklima. Das spezielle Gemisch an Gasen, das in der Erdatmosphäre zu finden ist, ist für das Leben auf der Erde essenziell. Denn durch dieses werden sowohl die Erdoberfläche und ihre Bewohner vor schädlicher Strahlung bewahrt als auch Temperaturschwankungen zwischen Tag und Nacht abgemildert und die globale Durchschnittstemperatur gehoben. Zentral ist dabei der natürliche Treibhauseffekt der Atmosphäre. Dieser macht Leben auf der Erde, die sonst weitgehend gefroren wäre, erst möglich.

Der Treibhauseffekt resultiert aus der Eigenschaft sogenannter Treibhausgase wie Kohlendioxid, Methan und Wasserdampf, eingehende Sonnenstrahlen passieren zu lassen, während diese Gase die von der so erwärmten Erde ausgehende Wärmestrahlung wiederum teilweise aufnehmen und zur Erde zurückstrahlen. So kommt es zu einem Wärmestau, der zu einem Temperaturunterschied von etwa 33 Grad Celsius (von minus 18 Grad auf plus 15 Grad) der globalen Durchschnittstemperatur führt. Die Wirkung und Relevanz der Treibhausgase für die Temperaturverhältnisse der Erde ist schon länger bekannt und wurde im 19. Jahrhundert von Naturwissenschaftlern wie Jean-Baptiste Fourier, John Tyndall und Svante Arrhenius diskutiert, in ersten Experimenten quantifiziert und seitdem in moderneren Studien immer wieder von Neuem belegt.¹⁵

11 Vgl. Markus Ziese/Andreas Becker/Kristina Fröhlich, El Niño 2015 – Erste Erkenntnisse und Ausblick, 2. 11. 2015, www.dwd.de/DE/leistungen/besondereereignisse/niederschlag/20151102_el_nino_auswertung_ausblick.pdf?__blob=publicationFile&v=6.

12 Siehe www.pmel.noaa.gov/elnino/faq.

13 Vgl. DWD, Wetterlexikon. Sonnenflecken-Relativzahl, o.D., www.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar.html?lv2=102248&lv3=102530.

14 Vgl. Naomi Halbach, Klimawandel #Kurzerklärt, 2018, S. 3, www.mpi-bremen.de/Binaries/Binary5786/KlimawandelKurzerklaert-Gesamtpaket.pdf.

15 Vgl. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Climate Change. Synthesis Report, Genf 2015, S. 2–8, www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/SYR_AR5_FINAL_full.pdf; Sabine Krüger, Der Treibhauseffekt – natürlich und anthropogen, 8. 12. 2015, www.dwd.de/DE/wetter/thema_des_tages/2015/12/8.html.

Auch die Gasanalysen der zuvor diskutierten Eisbohrkerne bestätigen den direkten Zusammenhang von Treibhausgaskonzentrationen und globalen Temperaturen. Dank dieser Eisbohrkerne lässt sich herleiten, dass die heutige Konzentration von Kohlenstoff in der Atmosphäre mit über 410 ppm (*parts per million*) die höchste seit 800 000 Jahren ist.¹⁶ Solche Werte können zuletzt für das Pliozän festgestellt werden, also für eine Phase, die vor etwa 2,5 Millionen Jahren endete und in der der Meeresspiegel um etwa 15 bis 25 Meter höher war als heute.¹⁷

Spätestens mit dem Eintritt in das Industriezeitalter Mitte des 18. Jahrhunderts wirkt der Mensch als dominante Kraft auf Umwelt und Klima. Obwohl wir uns offiziell weiterhin im erdgeschichtlichen Zeitabschnitt des Holozäns befinden, wird seit einiger Zeit in Fachgremien diskutiert, ob die vom griechischen *anthropos* (Mensch) abgeleitete Bezeichnung „Anthropozän“ nicht passender wäre.¹⁸ Unbestritten befinden wir uns in einer Epoche, in der das Gleichgewicht des Erd- und Klimasystems stark durch menschliche Aktivitäten beeinflusst wird: Für die Energiegewinnung verbrennen wir fossile Energieträger wie Kohle, Öl und Erdgas und setzen so Treibhausgase wie Kohlenstoffdioxid und Methan in die Atmosphäre frei. Es ist kein natürlicher Prozess bekannt, der eine so schnelle Zunahme an Treibhausgasen in der lebenswichtigen chemischen Zusammensetzung der Atmosphäre erklären könnte, zudem unterscheidet sich durch Verbrennung entstandenes Kohlenstoffdioxid chemisch von dem anderen Ursprungs. Durch die Analyse der Isotope lässt sich daher jeweils der Anteil von Kohlenstoffdioxid aus Ozeanen, Pflanzen und eben fossiler Verbrennung ermitteln. Die durch Zunahme der Treibhausgase verursachte Erwärmung lässt sich so zweifellos auf durch Menschen verursachte Emissionen zurückführen.¹⁹

16 Siehe <https://scripps.ucsd.edu/programs/keelingcurve>.

17 Vgl. Georgia Grant et al., The Amplitude and Origin of Sea-Level Variability During the Pliocene Epoch, in: *Nature* 574/2019, S. 237–241.

18 Vgl. Gabriele Dürbeck, Das Anthropozän erzählen: fünf Narrative, in: APuZ 21–23/2019, S. 11–17; Subcommission on Quaternary Stratigraphy, Working Group on the ‚Anthropocene‘, <http://quaternary.stratigraphy.org/working-groups/anthropocene>.

19 Vgl. National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), The Data: The Story Told from CO2 Samples, www.esrl.noaa.gov/gmd/outreach/isotopes/mixing.html.

Seit dem Beginn der Industrialisierung hat sich die globale Durchschnittstemperatur der Erde bereits um etwa ein Grad Celsius erhöht. Die Erwärmung kann lokal allerdings deutlich stärker ausfallen. Denn der Fokus auf einen globalen Mittelwert täuscht darüber hinweg, dass sich Landflächen viel schneller erwärmt haben, während die Ozeane die aufgenommene Wärme in tieferliegende Meeresschichten transportieren.²⁰ Die Erwärmung der Erde und der sie umgebenden Atmosphäre hat auch unmittelbare Folgen für die physikalische Eigenschaft, Wasserdampf zu speichern. Eine wärmere Atmosphäre kann mehr Luftfeuchtigkeit binden; zugleich fördert die Erderwärmung eine verstärkte Verdunstung von Wasser, was wiederum an anderer Stelle eine Zunahme von Regen bedeuten kann. Die Veränderung von Niederschlagsmustern ist allerdings global nicht so einheitlich wie die Zunahme der gemessenen Temperaturen. Dies liegt vor allem am starken Zusammenhang von Regen und der ihn transportierenden atmosphärischen Zirkulation. So fördert das vermehrt in der Atmosphäre aufgenommene Wasser die Zunahme von Regen vor allem in Regionen Zentralnordamerikas, Osteuropas und Russlands sowie im Westen Südamerikas und im Norden Australiens. Für die Mittelmeerregion, für Zentral- und Westafrika sowie für Ostasien wurde dagegen eine starke Verringerung des Niederschlags festgestellt. Anhand von Studien lässt sich aber aufzeigen, dass global insbesondere Extremniederschläge zunehmen und diese Veränderung über die Zunahme der globalen Mitteltemperatur zu erklären ist.²¹

WETTEREXTREME

Wenn Klima als Statistik den physikalischen Randbedingungen folgt, so ist die Erderwärmung Ausdruck der Tatsache, dass unser Wetter im Durchschnitt immer wärmer wurde. Neun der zehn heißesten Jahre seit 1880, dem Beginn regelmäßiger Aufzeichnungen auf globaler Ebe-

20 Vgl. Chris Mooney/John Muyskens, Dangerous New Hot Zones Are Spreading Around the World, 11.9.2019, www.washingtonpost.com/graphics/2019/national/climate-environment/climate-change-world.

21 Vgl. Jascha Lehmann/Finn Mempel/Dim Coumou, Increased Occurrence of Record-Wet and Record-Dry Months Reflect Changes in Mean Rainfall, in: *Geophysical Research Letters* 24/2018, S. 13468–13476.

ne,²² wurden im 21. Jahrhundert gemessen. Die vergangenen fünf Jahre waren die fünf heißesten dieser „Top Ten“, und das Jahr 2019 wird mit den Temperaturrekorden vom Juni und Juli zu großer Wahrscheinlichkeit das letzte Jahr vor 2005 (1998, ein stark von El Niño beeinflusstes Jahr) von der Liste verdrängen.²³

Als Folge breiten sich Warmzonen nach Norden aus, Frühlingswärme tritt früher ein, Winter werden milder und kürzer, und Sommer werden immer extremer. Denn eine Verschiebung des Durchschnittswetters bedeutet als Konsequenz auch eine Zunahme von extremen Wetterphänomenen in Intensität und Häufigkeit. Eine direkte Folge der Erwärmung sind eine größere Anzahl von Hitzetagen und länger anhaltende großflächige Hitzewellen. Lokale Hitzerekorde werden, wie im Sommer 2019 jüngst messbar war, in immer kürzeren Abständen gebrochen. Nimmt man die Durchschnittswerte der Jahre 1981 bis 2010 als Referenz, so lässt sich beispielsweise in Deutschland in den vergangenen Jahrzehnten ein starker Anstieg ungewöhnlich warmer Monate und Jahre nachweisen, die Entwicklung von extremen Niederschlägen ist in Deutschland dagegen nicht so eindeutig.²⁴

Freilich gab es schon immer Wetterextreme. Woher können wir uns also sicher sein, dass der Klimawandel und menschliche Emissionen zum Beispiel aus fossiler Energiegewinnung oder veränderter Landnutzung zu ihrer Häufigkeit und Intensität beitragen? Ein vergleichsweise neues Feld der Klimaforschung, in dem man sich dieser Frage widmet, ist die Extremwetter-Attribution. Mit Hilfe von Computermodellen werden die aktuellen Rahmenbedingungen einzelner Extremwetterereignisse möglichst genau simuliert und so die Wahrscheinlichkeit des Eintretens eines bestimmten Extremereignisses in Ausbreitung, Dauer und Intensität unter realen Klimaverhältnissen ermittelt. Die genutzten Klimamodelle erlauben es aber zugleich, ähnlich wie bei einem Laborexperiment, einzelne Parameter wie beispielsweise die Konzentration von

Treibhausgasen in der Atmosphäre zu verändern und so zu testen, wie sich die Änderung auf den Rest des Klimasystems auswirkt. Stellt man beispielsweise die Werte der Treibhausgaskonzentration im Modell einmal auf aktuelle und einmal auf vorindustrielle Werte ein, lässt sich über das Vergleichen der Ereigniswahrscheinlichkeiten der beiden Experimente eine Aussage über den Einfluss menschlicher Emissionen auf ein bestimmtes Extremwetterereignis machen. So lässt sich nachvollziehen, dass insbesondere in Europa nahezu alle Hitzeextreme der jüngsten Vergangenheit durch menschliche Emissionen verschlimmert und wahrscheinlicher wurden, wobei das genaue Ausmaß von der Art des Ereignisses abhängt.²⁵

Obwohl der weniger eindeutige Trend bei Niederschlagsextremen auf den ersten Blick etwas anderes vermuten lässt, können auf diese Weise auch vereinzelt Regenextreme dem Klimawandel und menschlichen Emissionen zugeordnet werden. So wurde beispielsweise im Rahmen eines an der US-amerikanischen Stony Brook University angesiedelten Projekts geschätzt, dass die Regenmenge des tropischen Wirbelsturms Florence, der im September 2018 an der US-Ostküste Schäden in Milliardenhöhe verursachte, durch anthropogene Erwärmung um etwa 50 Prozent erhöht wurde.²⁶

Neben diesen direkten Einflüssen der globalen Erwärmung auf unser Wetter werden durch diese auch andere Komponenten des Klimasystems beeinflusst. Ein wichtiger Effekt ist der Anstieg des Meeresspiegels durch thermische Ausdehnung, sowie das Abschmelzen von Gletschern und der Rückgang des Meereises. Über komplexe Zusammenhänge des Klimasystems können sich solche Veränderungen indirekt auf unser Wetter auswirken. So wird seit Längerem diskutiert, ob sich Veränderungen im Meereis auf die atmosphärische Zirkulation auswirken. Falls ja, könnte es im Winter häufiger zur Verbreitung arktischer Kaltluft in gemäßigteren Breiten und so zu Kälteextremen kommen.²⁷

22 Vgl. Adrian Leyser, Globale Erwärmung: Rekorde am laufenden Band, 21. 5. 2016, www.dwd.de/DE/wetter/thema_des_tages/2016/5/21.html.

23 Vgl. NOAA National Centers for Environmental Information, State of the Climate. Global Climate Report for July 2019, 3. 12. 2019, www.ncdc.noaa.gov/sotc/global/201907.

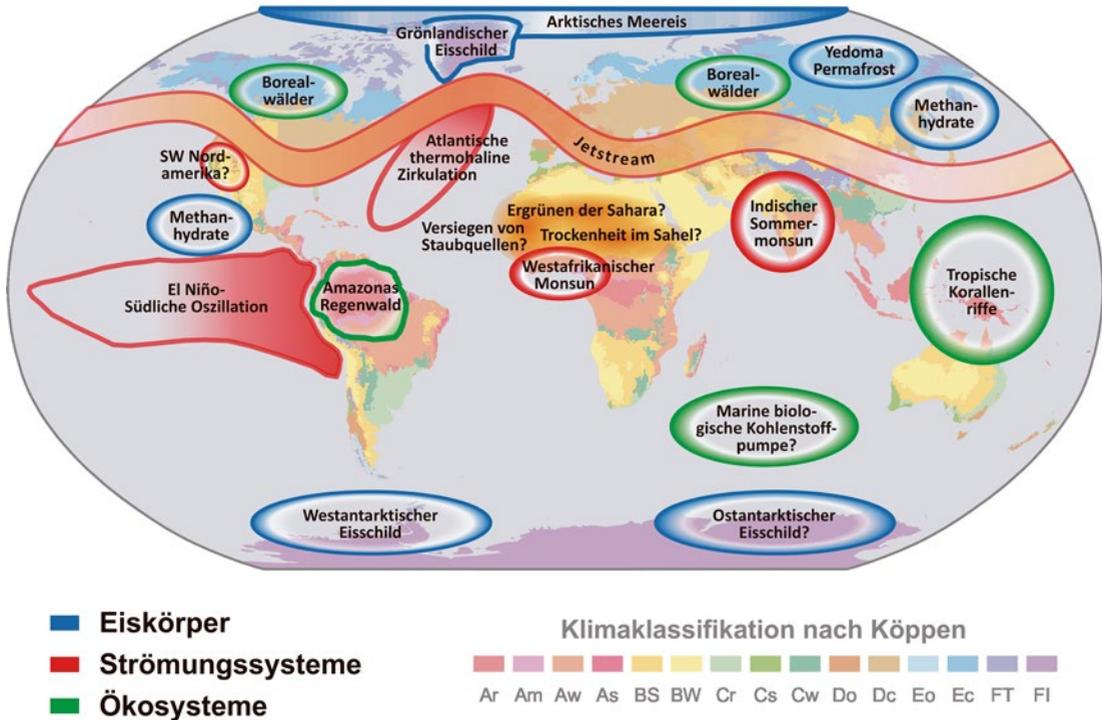
24 Vgl. DWD, Zeitreihen und Trends, o.D., www.dwd.de/DE/leistungen/zeitreihen/zeitreihen.html?nn=344886#buehneTop.

25 Vgl. Martha Vogel et al., Concurrent 2018 Hot Extremes Across Northern Hemisphere Due to Human-Induced Climate Change, in: *Earth's Future* 7/2019, S. 692–703. Siehe auch www.worldweatherattribution.org.

26 Siehe www.somas.stonybrook.edu/2018/09/13/estimating-the-potential-impact-of-climate-change-on-hurricane-florence.

27 Siehe www.nature.com/collections/bfihgidbhc.

Kippelemente im Erdsystem



PIK 2017

Fragezeichen kennzeichnen Systeme, deren Status als Kippelement wissenschaftlich noch nicht gesichert ist. Die Klassifikation der Klimatypen geht auf den Meteorologen und Klimatologen Wladimir Köppen (1846–1940) zurück. Anhand von Klimaindikatoren wie der natürlichen Vegetation und Faktoren wie der Niederschlagsmenge lassen sich nach Köppen sechs Haupttypen definieren: tropisches (Ar, Am, Aw, As), trockenes (BS, BW), subtropisches (Cr, Cs, Cw), gemäßigt (Do, Dc), boreales (Eo, Ec) und polares (FT, FI) Klima.

Quelle: Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung 2017, www.pik-potsdam.de/services/infotehek/kippelemente/kippelemente.

WIE SIEHT DAS WETTER DER ZUKUNFT AUS?

Es wird vermutet, dass die Stärke tropischer Wirbelstürme, die Jahr für Jahr auf die Ostküsten am Atlantik und Pazifik treffen, mit der Erwärmung zunimmt. Allein die Erhöhung des Meeresspiegels und die höhere Wasserspeicherkapazität der Atmosphäre als Effekte der globalen Erwärmung machen tropische Wirbelstürme verheerender, da Sturmfluten weiter ins Landesinnere hineinreichen und die Niederschlagsmenge ansteigt. Das vermehrte Auftreten von Wetterextremen macht zudem das gleichzeitige Auftreten zweier Extreme wahrscheinlicher, was Infrastruktur und Versorgung gleich mehrfach belastet und so zu höheren Schäden und Verlusten an Menschenleben führen kann. Die Erforschung struktureller Zusammenhänge als Summe einzelner isolierter Extreme und ihrer Wechselwirkungen ist daher von besonderem Interesse.

Zwar können für die kommenden Jahrzehnte keine Wettervorhersagen gemacht werden, da aber das Klima physikalischen Randbedingungen folgt, lässt unser Verständnis vom Erdsystem Klimaprognosen unter verschiedenen Emissionsszenarien zu. Diese Projektionen lassen sich als Leitfäden verstehen, an denen sich unser zukünftiges Wetter bis zum Ende des 21. Jahrhunderts orientieren wird. Die Entwicklung dieser Szenarien ist herausfordernd, bedingt insbesondere durch die Nichtlinearitäten im Klimasystem. Durch die Wechselwirkungen einzelner Komponenten des Klimasystems führen diese dazu, dass Veränderungen eines Teilsystems meist Veränderungen in anderen Subsystemen nach sich ziehen. Solche Wechselwirkungen können zu sogenannten positiven Rückkopplungen führen, welche sich, einmal initiiert, selbst verstärken.

Ein Beispiel dafür sind die Permafrostböden, die in höheren Breiten durch die längeren Som-

mer und milderen Winter auftauen – ein Prozess, bei dem das starke Treibhausgas Methan freigesetzt wird, was die Erwärmung wiederum verstärkt. Ein weiteres Beispiel ist das schmelzende Meereis. Die helle Eisoberfläche reflektiert Sonnenlicht und Wärme in größerem Maße als dunkles Meerwasser, das Wärme stärker absorbiert. Das Schmelzen des Meereises steigert so die Aufnahme von Wärme in den Ozeanen, wodurch das Eis (noch) schneller schmilzt, was wiederum die Erwärmung beschleunigt.

Weitere Beispiele der nichtlinearen Wechselwirkungen im Klimasystem sind die sogenannten Kippelemente (*Abbildung*). Mit diesem Begriff werden Prozesse beschrieben, die, vergleichbar mit einer Reihe von Dominosteinen, vom Klimawandel getrieben, ab einem gewissen Grenzwert in einen neuen Zustand kippen. Einmal angestoßen, verselbständigen sie sich und entziehen sich unserer Kontrolle durch etwaige Emissionsminderungen. Ein identifiziertes Kippelement im Klimasystem ist zum Beispiel der grönländische Eispanzer. Wenn sich durch Abschmelzen die Höhe des Grönlandeises so sehr vermindert, dass es wärmerer Luft ausgesetzt ist, und Niederschlag vermehrt in Form von Regen anstatt von Schnee niedergeht, wird der Schmelzprozess weiter und unaufhaltsam beschleunigt. Das Abschmelzen des Grönlandeises wiederum führt schon jetzt zu einer Veränderung des Salzgehalts im anliegenden Ozeanbecken. Diese Veränderung der Salinität wirkt sich auf die Ozeanzirkulation im Atlantik, die thermohaline Zirkulation, durch die verschiedene Meeresströmungen miteinander verbunden werden, oder den Golfstrom aus. Mögliche Auswirkungen auf die atmosphärische Zirkulation und den Jetstream hätten dann direkte Folgen für unser Wetter.

Neueren Studien zufolge ist der westantarktische Eisschild mit großer Wahrscheinlichkeit bereits gekippt.²⁸ Dies würde bedeuten, dass dieser Prozess, der einen Anstieg des Meeresspiegels um

einige Meter bedeuten würde, nicht mehr aufzuhalten wäre. Die Existenz dieser nichtlinearen Zusammenhänge verdeutlicht, wie komplex das Klimasystem ist und lässt befürchten, dass in Klimaprojektionen Veränderungen des Wetters der Zukunft zumeist eher konservativ, also eher vorsichtig abgeschätzt wird.

Die in der Vergangenheit mit Klimamodellen erstellten wissenschaftlichen Prognosen zur Entwicklung des Erdklimas unter gestiegenen Treibhausgasemissionen sind weitgehend eingetroffen, mit den Konsequenzen für Wetter und Umwelt, die wir heute spüren. Während in den vergangenen zwei Jahrhunderten der Mensch auf das Klima eingewirkt hat, erleben wir mittlerweile, wie Wetterextreme mehr und mehr auf den Menschen einwirken. Hitzewellen sind insbesondere in unseren Breiten das gemeinhin tödlichste Wetterextrem und besonders gefährlich für die Schwächeren der Gesellschaft, etwa ältere Menschen, Kleinkinder, Kranke und Menschen ohne Zugang zu fließendem Wasser oder kühlenden Innenbereichen.

Um weitere Gefahren und Risiken abzuwenden, wurde 2015 das Pariser Klimaabkommen geschlossen, das eine Eindämmung der globalen Durchschnittstemperatur auf unter 2 Grad Celsius, möglichst auf 1,5 Grad bis zum Ende des 21. Jahrhunderts vorsieht.²⁹ Dieser Wert wurde nicht zuletzt mit Blick auf die Kippelemente im Erdsystem als wichtige Leitplanke festgelegt, um Risiken zu verhindern.³⁰ Klimamodelle helfen dabei, die für diesen Wert maximal verbleibenden Emissionen einzuschätzen. Menschliche Treibhausgasemissionen sind dabei der zentrale physikalische Parameter für zukünftige Klimaprojektionen. Aktuelle Emissionswerte weisen zurzeit auf einen globalen Durchschnittswert zu von über 3 Grad zum Ende dieses Jahrhunderts hin³¹ – ein Wert, der lokale Extremwetterbedingungen beispiellosen Ausmaßes zur Folge hätte. Für das Wetter unserer Zukunft treffen wir also bereits heute die Entscheidungen.

28 Vgl. Ian Joughin/Benjamin E. Smith/Brooke Medley, Marine Ice Sheet Collapse Potentially under Way for the Thwaites Glacier Basin, West Antarctica, in: *Science* 6185/2014, S. 735–738.

29 Vgl. United Nations, Paris Agreement, Paris 2015, https://unfccc.int/files/essential_background/convention/application/pdf/english_paris_agreement.pdf.

30 Vgl. Timothy M. Lenton et al., Climate Tipping Points – Too Risky to Bet Against, 27. 11. 2019, www.nature.com/articles/d41586-019-03595-0.

31 Siehe <https://climateactiontracker.org/global/temperatures>.

KAI KORNUBER

ist promovierter Klimatologe und forscht am Lamont-Doherty Earth Observatory und am Earth Institute der Columbia University in New York insbesondere zu den Zusammenhängen zwischen Atmosphärendynamik, Klimawandel und Extremwetterereignissen. kk3397@columbia.edu

GESELLSCHAFTLICHER UMGANG MIT WETTEREXTREMEN

Risiko, Management und Anpassung

Simone Sandholz · Dominic Sett

Die Anzahl und Intensität von Wetterextremen nimmt global zu,⁰¹ verursacht insbesondere durch wachsende anthropogene Einflüsse auf das Klima. Dies ist eine der zentralen Erkenntnisse des 2012 veröffentlichten Sonderberichts des Weltklimarats (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC), in dem auf Extremereignisse und Katastrophen fokussiert wurde.⁰² Dieser Trend wird auf regionaler Ebene beispielsweise in auf Deutschland projizierten Klimamodellen bestätigt. Demnach wird eine Zunahme der Wahrscheinlichkeit des Eintretens von Wetterextremen prognostiziert, neben Niederschlagsmengen und Windgeschwindigkeiten sollen vor allem Temperaturhöchstwerte im Verlauf des 21. Jahrhunderts stark ansteigen.⁰³ Die Häufung von zuletzt außergewöhnlich warmen Jahren und die jüngst im Juli 2019 in Deutschland erzielten Hitzerekorde scheinen diese Prognose zu stützen.⁰⁴ In den vergangenen Jahren wurde zudem eine Zunahme der durch diese Ereignisse ausgelösten Schäden und Verluste verzeichnet. Wetterextreme wirken sich immer stärker zu Lasten von Bevölkerung, Umwelt und Wirtschaft aus. So führten Extremniederschläge im Juni 2013 zu schweren Überflutungen in Mitteleuropa, die Schäden in Milliardenhöhe verursachten und darüber hinaus allein in Deutschland 14 Menschen das Leben kosteten.⁰⁵ Weltweit sind zwischen 2000 und 2018 fast eine halbe Million Menschen durch Wetter- und Klimaereignisse ums Leben gekommen und ökonomische Verluste von mehr als 2500 Milliarden US-Dollar entstanden.⁰⁶ Diese Werte verdeutlichen die Relevanz von Maßnahmen zur Minderung des Risikos.

BEGRIFFSKLÄRUNG

„Wetterextreme“ sind definiert als Auftreten besonders hoher oder niedriger Werte von Varia-

blen wie Temperatur, Niederschlag und Wind, die jenseits statistisch üblicher Beobachtungswerte liegen und somit „ungewöhnlich“ sind.⁰⁷ Oftmals werden Extremereignisse neben dieser statistischen Ermittlung auch über ihre physikalischen Folgewirkungen definiert.⁰⁸ Nicht allein die Regenmenge macht ein Niederschlagsereignis also zu einem Extrem, sondern eben die Kombination aus ungewöhnlich viel Regen und dem Auftreten von Überflutungen.

An dieser Begriffserläuterung wird deutlich, dass es keine globalen Schwellenwerte geben kann, um Wetterereignisse als Extreme einzustufen, sondern dass sich eine Einstufung lokal sehr unterscheidet. In Deutschland werden beispielsweise „gefühlte Temperaturen“ – also die Temperaturen, bei denen neben der Lufttemperatur auch die Luftfeuchtigkeit, Strahlungsintensität und Windstärke berücksichtigt werden – von mindestens 38 Grad Celsius durch den Deutschen Wetterdienst (DWD) als „extreme Wärmebelastung“ eingestuft.⁰⁹ Die Lufttemperatur von 38 Grad Celsius allein wäre vielerorts in Deutschland ein Hitzerekord. Im Gegensatz dazu liegt beispielsweise im indischen Delhi die maximale Tagestemperatur in den Sommermonaten durchschnittlich bei über 40 Grad Celsius.¹⁰ Was also in einer Region als Wetterextrem gilt, ist andernorts mitunter gewöhnlich.

Neben der sehr differenzierten Kategorisierung ist auch der Effekt von Extremereignissen auf Menschen, Umwelt und Wirtschaft unterschiedlich. Hier kommt der Begriff des „Risikos“ ins Spiel, der beschreibt, welche Folgen beim Eintritt von Wetterextremen zu erwarten sind. In der Vergangenheit wurden Katastrophenrisiken sehr stark durch die Charakteristika der Naturereignisse selbst erklärt, also beispielsweise durch die Höhe der Temperatur oder das räumliche Ausmaß von Überflutun-

gen. Heute ist in der Risikoforschung Konsens, dass neben der Naturgefahr auch die Verwundbarkeit und die Exposition bedeutende Faktoren sind (*Abbildung*).¹¹ Risiko ergibt sich also nicht nur aus einem Wetterereignis allein, sondern in Kombination mit der Frage, wer oder was von dem Ereignis wie betroffen ist, und dem Ort, an dem das Ereignis stattfindet. Zum Beispiel wirkt sich eine Hitzewelle stärker auf Personen aus, die gesundheitlich vorbelastet sind und in innerstädtischen schlecht gedämmten Wohnungen leben als auf Personen ohne gesundheitliche Probleme mit gut gedämmten Wohnungen in einem begrünten Stadtviertel.

Es wird also nur dann aus einem Wetterextrem eine Katastrophe, wenn ebenfalls eine hohe Verwundbarkeit und Exposition vorliegen, die Notfallmaßnahmen erforderlich machen, um die Situation zu bewältigen. Bei sehr hoher Verwundbarkeit und Exposition können jedoch auch nicht-extreme Wetterphänomene Katastrophen hervorrufen. Diese Differenzierung spielt beim Management des Risikos eine wichtige Rolle.¹²

01 Trotz hoher Wahrscheinlichkeiten für allgemeine globale Trends gibt es regional und zwischen verschiedenen Naturereignissen deutliche Unterschiede in Bezug auf die statistische Signifikanz, mit der diese Trends wissenschaftlich belegt werden können.

02 Vgl. IPCC, *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation*, Cambridge–New York 2012, www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/SREX_Full_Report-1.pdf.

03 Vgl. Thomas Deutschländer/Clementine Dalelane, *Auswertung regionaler Klimaprojektionen für Deutschland hinsichtlich der Änderung des Extremverhaltens von Temperatur, Niederschlag und Windgeschwindigkeit*, Offenbach 2012, S. 102 ff., www.dwd.de/DE/klimaumwelt/klimaforschung/klimaprojektionen/extremereignisse/abschlussbericht-2012.pdf;jsessionid=C83EA771F5381F20814DA67ACE8CD999.live21062?__blob=publicationFile&v=1.

04 Vgl. Karsten Friedrich/Frank Kaspar, *Rückblick auf das Jahr 2018 – das bisher wärmste Jahr in Deutschland*, 2. 1. 2019, www.dwd.de/DE/leistungen/besondereereignisse/temperatur/20190102_waermstes_jahr_in_deutschland_2018.pdf?__blob=publicationFile&v=2, S. 1 f.; Peter Bissolli et al., *Hitzewelle 2019 in Westeuropa – neuer nationaler Rekord in Deutschland*, 1. 8. 2019, S. 3, www.dwd.de/DE/leistungen/besondereereignisse/temperatur/20190801_hitzerekord_juli2019.pdf?__blob=publicationFile&v=2.

05 Vgl. Deutsches Komitee Katastrophenvorsorge/Universität Potsdam (Hrsg.), *Das Hochwasser im Juni 2013. Bewährungsprobe für das Hochwasserrisikomanagement in Deutschland*, Bonn 2015, S. 44. Der Gesamtschaden des Hochwassers 2013 in Deutschland wird dabei auf etwa 6 Milliarden Euro geschätzt. Vgl. ebd., S. 34.

HERAUSFORDERUNGEN FÜR RISIKOMANAGEMENT UND ANPASSUNG

Das Katastrophenrisiko unterscheidet sich zwischen verschiedenen Ländern und Regionen sehr stark, bedingt durch unterschiedliche Verwundbarkeiten und Expositionen. So fordern Wetter- und Klimaereignisse in ärmeren Ländern fast fünfmal so viele Todesopfer pro Ereignis wie in den reichsten Ländern. Ökonomische Schäden dagegen sind in reichen Ländern deutlich größer. Dort ist jedoch knapp die Hälfte (49,6 Prozent) dieser Schäden versichert, während dieser Anteil in Ländern der niedrigsten Einkommen bei gerade einmal 3,4 Prozent liegt.¹³ Im Umkehrschluss können also ökonomisch vergleichsweise geringe Schäden eines Wetterextrems trotzdem dramatischere Auswirkungen haben, wenn die betroffenen Länder und Personen über weniger Möglichkeiten der Risikobewältigung verfügen.

Der hieraus ersichtliche Zusammenhang von Extremwetterauswirkungen und Einkommen legt zudem nahe, dass nicht nur zwischen verschiedenen Ländern, sondern auch zwischen verschiedenen Bevölkerungsschichten innerhalb eines Landes große Unterschiede bestehen. Marginalisierte Gruppen in einer Gesellschaft sind oft besonders verwundbar und exponiert gegenüber Wetterereignissen.¹⁴ Dazu zählen beispielsweise Bewohner:innen informeller Siedlungen, die durch mangelnde Besitzrechte oft über keinen

06 Grundlage ist die Datenbank „Natcatservice“ der Rückversicherung Munich Re. Berücksichtigt wurden 10058 meteorologische, hydrologische und klimatologische Ereignisse, siehe Natcatservice, <https://natcatservice.munichre.com/percentages/?filter=eyJ5ZWVfYnJvSl6MjAwMCwieVVhclRvJj0yMDE4LCJldmVudEZhbWlseUlkcyl6WzQsNSw3XX0%3D&type=2>.

07 IPCC (Anm. 2), S. 40.

08 Vgl. Peter C. Young, *Advances in Real-Time Flood Forecasting*, in: *Philosophical Transactions of the Royal Society* 1796/2002, S. 1433–1450.

09 Vgl. DWD Wetterlexikon. Hitzewelle o.D., www.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar.html?lv2=101094&lv3=624852.

10 Siehe [https://data.gov.in/catalog/climatology-data-important-cities-5?filters%5Bfield_catalog_reference%5D=394661&format=json&offset=0&limit=6&sort%5Bcreated%5D=desc%20\[data%20download\]](https://data.gov.in/catalog/climatology-data-important-cities-5?filters%5Bfield_catalog_reference%5D=394661&format=json&offset=0&limit=6&sort%5Bcreated%5D=desc%20[data%20download]).

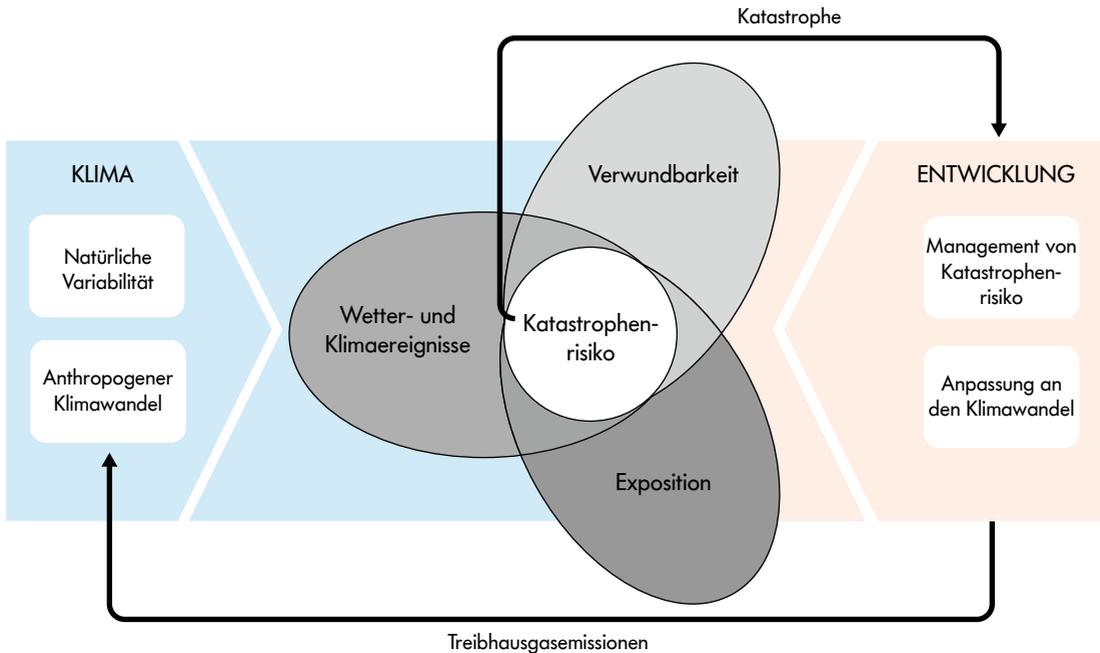
11 Vgl. IPCC (Anm. 2), S. 31 ff.

12 Vgl. ebd., S. 31–56.

13 Vgl. Natcatservice (Anm. 6).

14 Vgl. IPCC, *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects*, Cambridge–New York 2014, S. 50.

Abbildung: Risikokonzept des IPCC-Sonderberichts 2012



Quelle: IPCC, Management des Risikos von Extremereignissen und Katastrophen zur Förderung der Anpassung an den Klimawandel. Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger, deutsche Übersetzung durch die Deutsche IPCC-Koordinierungsstelle, Bonn 2015, S. 2, www.de-ipcc.de/media/content/IPCC-SREX-SPM_vorlaufufige-Uebersetzung_Jan2016.pdf.

Zugang zu Bankkonten, Krediten und Versicherungen verfügen, oder Gruppen, deren Teilhabe an politischen Entscheidungsprozessen eingeschränkt ist und deren Bedürfnisse entsprechend wenig Gehör finden. Auch in Ländern mit hohem Durchschnittseinkommen gibt es Unterschiede bei Verwundbarkeit und Exposition, die beispielsweise vom Einkommen, gesundheitlichem Zustand oder dem genauen Wohnort abhängig sein können. Interventionen zum Risikomanagement sollten daher vor allem auf die Ärmsten und Verwundbarsten der jeweiligen Gesellschaft abzielen.¹⁵

Bedingt durch ihre hohe Bevölkerungs- und Bebauungsdichte kommt Städten beim Umgang mit Wetterextremen eine besondere Bedeutung zu. Mangelnde oder fehlende Planung, die zur Bebauung von gefährdeten Arealen wie Überflutungsgebieten führt, und unzureichende Infrastrukturen wie Kanalsysteme, die steigende Niederschlagsmengen nicht (mehr) aufnehmen können, erhöhen die Exposition der Bevölke-

rung. Darüber hinaus führt Marginalisierung, etwa durch städtische Segregation, und ein oftmals hoher Armutsanteil zu einem hohen Grad an Verwundbarkeit. So entsteht ein hohes Risiko, das entsprechende Herausforderungen für Stadtbewohner:innen bildet.

Allerdings können in Städten bei guter Planung auch viele Menschen mit wichtigen Leistungen versorgt und ihnen Schutzmöglichkeiten vor Extremwetter geboten werden. Das kann zur Reduzierung des Risikos führen und somit Chancen ermöglichen. Art und Ausmaß der jeweiligen Extremereignisse können sich dabei ebenso wie die jeweiligen gesellschaftlichen Bewältigungskapazitäten (regional) erheblich unterscheiden. Das verdeutlicht die Bedeutung von kontextspezifischen Strategien und Anpassungsmaßnahmen, um negative Effekte von Wetterextremen zu mindern und somit Katastrophen vorzubeugen, wie nachfolgend an Beispielen erläutert wird.

KAPSTADT

Kapstadt liegt, wie zahlreiche südafrikanische Städte, in einem Trockengebiet mit natürlich be-

¹⁵ Vgl. Mark Pelling/Matthias Garschagen, Put Equity First in Climate Adaptation, in: Nature 7756/2019, S. 327–329.

grenztem Angebot an verfügbarem Süßwasser. Die Versorgung wird zu 98,5 Prozent aus Oberflächenwasser, das in großen Staudämmen gespeichert wird, sichergestellt und ist damit fast komplett von Regen abhängig.¹⁶ Die Bevölkerung der Metropole steigt stetig an. Wohnen 1985 noch 1,9 Millionen Menschen in Kapstadt, waren es 2015 bereits 4,1 Millionen. Prognosen zufolge werden es 2035 etwa 5,8 Millionen sein.¹⁷ Die Nachfrage nach Trinkwasser wuchs entsprechend, zumal der Verbrauch durch steigenden Wohlstand und die wirtschaftliche Entwicklung zusätzlich stieg. Durch ineffizientes Management und den fehlenden Ausbau der entsprechenden Infrastruktur wurde dieser Schiefelage in der Wasserversorgung nur unzureichend entgegen gewirkt. Dadurch befand sich Kapstadt in einem zunehmenden Stadium der Wasserknappheit und gilt als ein globaler Hotspot.¹⁸

Auf diese ohnehin angespannte Situation traf 2015 eine extreme Dürre, die durch ungewöhnlich wenig Regen das verfügbare Wasser in den Staudämmen stark verringerte. Knapp unterdurchschnittliche Niederschlagsmengen im Jahr 2016 konnten diese Defizite nicht kompensieren. 2017 spitzte sich die Lage dann durch eine weitere extreme Dürre zu, was dazu führte, dass am Ende der Regenzeit im Oktober nur fast ein Drittel der sonst üblicherweise gespeicherten Wassermengen in den Staudämmen vorhanden war.¹⁹ Mit dem Eintreten der Trockenzeit war dadurch absehbar, dass Kapstadts Wasserspeicher nicht mehr ausreichen würden, um den Verbrauch bis zur nächsten Regenzeit zu decken. Die Wasserknappheit entwickelte sich so Ende 2017 zu einer Krise.

16 Vgl. Rebecca Cameron, *Every Last Drop: The Role of Spatial Planning in Integrated Urban Water Management in the City of Cape Town*, Dissertation, University of Cape Town 2014, S. 3.20.

17 Vgl. UN Department of Economic and Social Affairs, *World Urbanization Prospect: The 2018 Revision. Population of Urban Agglomerations with 300,000 Inhabitants or More in 2018*, <https://population.un.org/wup/Download>.

18 Vgl. Peter Burek et al., *Water Futures and Solution – Fast Track Initiative*, International Institute for Applied Systems Analysis, IIASA Working Paper 6/2016, S. 52.

19 Vgl. Department of Water and Sanitation Cape Town, *Water Outlook 2018 Report*, Kapstadt 31. 12. 2018, S. 1, http://resource.capetown.gov.za/documentcentre/Documents/City%20research%20reports%20and%20review/Water%20Outlook%202018_Rev%2030_31%20December%202018.pdf; City of Cape Town, *Dam levels*, 2019, <https://web1.capetown.gov.za/web1/OpenDataPortal/DatasetDetail?DatasetName=Dam%20levels>.

Durch Restriktionen versuchte die Stadtverwaltung, die drohende Einstellung der Wasserversorgung zu verhindern. Erste Beschränkungen, wie ein Verbot der Gartenbewässerung zu bestimmten Uhrzeiten oder das Auffüllen von Pools mit Leitungswasser, wurden bereits 2016 eingeführt. Mit zunehmender Wasserknappheit gipfelte die Restriktionen im Februar 2018 mit der Beschränkung auf nur noch 50 Liter pro Person und Tag.²⁰ Bei einem durchschnittlichen Verbrauch von zuvor 200 bis 230 Litern (im Zeitraum von 2005 bis 2016)²¹ bedeutete dies eine erhebliche Einschränkung für die meisten Menschen in Kapstadt.

Zugleich wurden die Preise für die Bereitstellung von Wasser enorm erhöht. Für einige Verbraucher:innen stieg der Preis zwischen Januar 2016 und Februar 2018 um mehr als das 31-Fache.²² Besonders ärmere Haushalte der Mittelschicht hatten teils große Schwierigkeiten, ihre Wasserrechnungen zu bezahlen. Einen Großteil der ärmsten Bevölkerungsschichten Kapstadts trafen die Restriktionen und Tarifierhöhungen dagegen weniger. Als mittellos eingetragene Bürger:innen sind von der Zahlung für Wasser befreit,²³ zudem leben viele dieser Menschen ohne direkten Wasseranschluss und sind damit ohnehin auf öffentliche Verteilstellen angewiesen. Ihr durchschnittlicher Wasserverbrauch liegt seit Jahren unterhalb der eingeführten Beschränkungen. Daher wurde die Krise insbesondere als eine der (unteren) Mittelschicht angesehen.

Im Januar 2018 wurde von der Stadt offiziell der 21. April als „Tag Null“ angedroht. Demnach sollte die Wasserversorgung aller Haushalte ab diesem Datum komplett eingestellt und eine Notversorgung an öffentlichen Plätzen errichtet werden, falls die bis dahin ergriffenen Maßnahmen nicht ausreichen würden.²⁴ Somit hätten die Bewohner:innen Kapstadts nach diesem Da-

20 Vgl. ebd., S. 3.

21 Vgl. dass., *Cape Town Water Outlook 2018*, Kapstadt 20. 7. 2018, S. 12, <http://resource.capetown.gov.za/documentcentre/Documents/City%20research%20reports%20and%20review/Water%20Outlook%202018%20Presentation.pdf>.

22 Vgl. Alternative Information and Development Centre, *Water Tariff Change*, Februar 2018, unveröffentlicht.

23 Vgl. Republic of South Africa, *Constitution of the Republic of South Africa*, Pretoria 1996.

24 Vgl. City of Cape Town, *Day Zero: When is it, What is it, and How Can We Avoid it?*, Kapstadt 15. 11. 2017, www.capetown.gov.za/Media-and-news/Day%20Zero%20when%20is%20it,%20what%20is%20it,%20and%20how%20can%20we%20avoid%20it.

tum für ihr Trinkwasser anstehen müssen, um an den vom Militär bewachten Ausgabestellen ihre tägliche Ration von nunmehr nur noch 25 Litern pro Person zu erhalten. Dieses Szenario war für viele Bevölkerungsgruppen, etwa Kinder, ältere Menschen oder jene, die in ihrer Mobilität eingeschränkt sind, undenkbar. Viele entschlossen sich daher dazu, selbst verschiedene formelle wie informelle Maßnahmen zu ergreifen. Eine dieser Strategien war das Sammeln von Regenwasser, während sich andere Bohrlöcher und Brunnen graben ließen, um Grundwasser zu nutzen. Zudem konnten fast alle Haushalte durch eine effizientere Wassernutzung den eigenen Verbrauch reduzieren.

Auf diese Weise konnte das Eintreten des „Tages Null“ verhindert werden. Um ähnliche Szenarien auch künftig zu verhindern, sind in Kapstadt allerdings weitere Maßnahmen notwendig. Insbesondere existierende Systeme sollten ausgebaut und effizienter gestaltet werden. Das gilt sowohl für das öffentliche Versorgungssystem als auch für private Technologien, insbesondere jene zur Nutzung von Regenwasser. Verbesserte Informationen und Anreize, etwa über Subventionen oder (Bau-)Regulierungen könnten hier weiterhelfen. Auch Bildung und die Sensibilisierung für eine effizientere Wassernutzung spielen eine große Rolle.

RIO DE JANEIRO

Rio de Janeiro ist mit 6,5 Millionen Einwohner:innen in der Kernstadt und 12,5 Millionen in der Metropolregion die zweitgrößte Agglomeration Brasiliens und die drittgrößte Südamerikas.²⁵ Obwohl die Stadt eines der wichtigsten Wirtschaftszentren des Landes ist, ist ein großer Teil der Bevölkerung arm. Rund 22 Prozent der Stadtbewohner:innen leben in einer der mehr als tausend informellen Siedlungen, den Favelas.²⁶ Diese wurden meist an steilen und vor der Bebau-

ung mit Küstenregenwald bewachsenen Hängen errichtet. Sie bieten oft prekäre Lebensbedingungen mit schlechter Infrastruktur. Die Häuser sind in der Regel technisch mangelhaft und mit schlechten Fundamenten ausgestattet, was in Kombination mit einer fehlenden oder unzureichenden Abwasserentsorgung zur Destabilisierung der Hänge führt und so das Risiko von Erdbeben bei Starkregen erhöht.

Starkniederschläge mit bis zu 200 bis 300 Millimetern innerhalb von ein bis zwei Tagen treten vorzugsweise in den Sommermonaten von Dezember bis März auf und sind der Hauptauslöser für Hangrutschungen.²⁷ In den vergangenen Jahrzehnten verursachten schwere Erdbeben und Überschwemmungen wiederholt Todesopfer und schwere Sachschäden in Rio de Janeiro, so 1967 (110 Todesopfer) und 1988 (etwa 120).²⁸ 2010 kam es zu 67 Todesopfern, Hunderten von zerstörten Häusern und schweren Schäden am städtischen Straßen- und Verkehrssystem.²⁹ Die Häufigkeit und Intensität dieser Ereignisse haben seit Mitte des 20. Jahrhunderts zugenommen. Prognosen deuten darauf hin, dass die Niederschläge bis 2070 um 20 Prozent und bis 2100 um bis zu 30 Prozent zunehmen werden – bei gleichzeitig länger werdenden Dürreperioden,³⁰ die das Katastrophenrisiko in der bereits fragilen Region weiter erhöhen. In der Vergangenheit wurden zahlreiche Favela-Bewohner:innen zwangsweise umgesiedelt, was zwar die direkte Exposition gegenüber Hangrutschungen verringerte, sich aber ansonsten als wenig nachhaltiges Konzept herausstellte, da die Umsiedlung meist in weit entfernte Stadtteile erfolgte und

²⁵ Vgl. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, *Manual de Delimitação dos Setores do Censo 2010*, Rio de Janeiro, 2010; UN Department of Economic and Social Affairs, *World Urbanization Prospect: The 2018 Revision. The 30 Largest Urban Agglomerations Ranked by Population Size at Each Point in Time*, 2018, <https://population.un.org/wup/Download>.

²⁶ Vgl. Fernando Cavallieri/Adriana Vial, *Favelas na cidade do Rio de Janeiro: o quadro populacional com base no Censo 2010*, Prefeitura do Rio de Janeiro, *Coleção Estudos Cariocas 20120501/2012*, S. 2, http://portalgeo.rio.rj.gov.br/estudos-cariocas/download%5C3190_FavelasnacidadedoRiodeJaneiro_Censo_2010.PDF.

²⁷ Vgl. Ana Maria de P.M. Brandão, *As chuvas e a ação humana: Uma infeliz coincidência*, in: Luiz P. Rosa/Willy A. Lacerda (Hrsg.), *Tormentas Cariocas*, Rio de Janeiro 1997, S. 21–38.

²⁸ Vgl. Robert L. Schuster/Daniel A. Salcedo/Luis Valenzuela, *Overview of Catastrophic Landslides of South America in the Twentieth Century*, in: Stephen G. Evans/Jerome V. DeGraff (Hrsg.), *Catastrophic Landslides: Effects, Occurrence, and Mechanisms*, *Reviews in Engineering Geology* 15/2002, S. 1–34.

²⁹ Vgl. The Government of Mexico/World Bank, *Landslide Risk Reduction Measures by the Rio de Janeiro City Government*, in: *Improving the Assessment of Disaster Risks to Strengthen Financial Resilience*, World Bank Working Paper 70988/2012, S. 77–92.

³⁰ Vgl. *Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas, Sumário Executivo GT1*, Rio de Janeiro 2013; Claudine P. Dereczynski/Wanderson Luiz Silva/José A. Marengo, *Detection and Projections of Climate Change in Rio de Janeiro, Brazil*, in: *American Journal of Climate Change* 1/2013, S. 25–33.

die Bewohner:innen so von ihren Arbeitsplätzen und ihrem sozialen Umfeld entfernte. In der Konsequenz wurden viele Favelas legalisiert, die Wohnbedingungen blieben aber oft prekär, das Risiko hoch.

Einige technische Ansätze zum Umgang mit dem Risiko wurden bereits realisiert. Seit 1996 warnt beispielsweise das Alarmsystem „Alerta Rio“ rund um die Uhr vor drohendem Starkregen, vor Überschwemmungen und Erdbeben. Das System verfügt über ein Netzwerk von 33 Telemetrie-Stationen, die über das gesamte Stadtgebiet verteilt sind. (Früh-)Warnungen gehen an die zuständigen Behörden der Stadtverwaltung, darunter den Zivilschutz oder die Wasserbehörde, die die Bevölkerung via Internet und Presse informieren. Nach den verheerenden Ereignissen 2010 schuf die Stadt zusätzlich ein Operationszentrum, das nicht nur rund um die Uhr in Betrieb ist, sondern auch gemeinsam von Beamten von rund 30 Verwaltungseinheiten besetzt ist. Mehr als 500 Fachleute wechseln sich im Schichtbetrieb ab. Sie verfügen dabei nicht nur über Zugang zu 800 stadteigenen und 700 weiteren Kameras, sondern auch über Kommunikationsmöglichkeiten zum Amtssitz des Bürgermeisters und zur städtischen Zivilschutzzentrale. Das im Zuge der Baumaßnahmen für die Olympischen Spiele 2016 errichtete Zentrum erleichtert nicht nur die Zusammenarbeit, die Abstimmung und den Datenaustausch zwischen Behörden und Stadtteilen im Krisenfall, sondern wird auch für die Organisation von Großveranstaltungen oder zur Verkehrssteuerung genutzt.³¹

Frühwarnung ist allerdings nur eine Komponente zur Minderung des Katastrophenrisikos. Insbesondere Favelas und ihre Bewohner:innen sind nach wie vor besonders verwundbar. Nicht alle Abteilungen der Stadtverwaltung sind in Favelas aktiv, die Zusammenarbeit zwischen administrativen Ebenen sowie zwischen formellen und informellen Akteuren ist begrenzt. Zudem liegt der Fokus in Rio de Janeiro bis heute auf baulichem Katastrophenschutz und der Stabilisierung von Hängen mit Hilfe von Betonkonstruktionen, wobei bei der Umsetzung dieser Maßnahmen Favelas nicht immer in die Planungen der Verwaltung integriert werden. Die Potenziale von sogenannter grüner Infrastruktur, in diesem

Fall Wiederaufforstung, und die Nutzung von Synergien mit laufenden Programmen der städtischen Umweltbehörde, umgesetzt mit Unterstützung der Favela-Bewohner:innen, werden erst allmählich erkannt.³²

Bisher sind lokale Anpassungsmaßnahmen nur selten in größere Programme integriert und haben auch aufgrund des Mangels an finanziellen Mitteln, langfristigen Perspektiven und verfügbaren Flächen nur geringe Auswirkungen. Die Kombination aus zunehmenden Klimawandeleinflüssen, Entwaldung, Urbanisierung beziehungsweise Nachverdichtung sowie dem fehlenden politischen Willen, Probleme aktiv anzugehen und Favelas als Teil der Stadt anzuerkennen, erhöht das Katastrophenrisiko weiter. Ohne angemessenen Katastrophenschutz und Nothilfeprogramme werden viele Favelas weiterhin anfällig für Extremereignisse bleiben.

BONN

Auf eine Zunahme von Extremwetterereignissen müssen sich auch Städte in Deutschland einstellen. Dazu gehören neben Starkregen und Überschwemmungen auch sommerliche Hitzewellen. Allein die Hitzewelle 2003 führte zu mehreren Tausend Todesfällen allein in Deutschland,³³ wobei über drei Viertel davon Personen im Alter von über 75 Jahren waren.³⁴ Städte sind dabei besonders betroffen, unter anderem durch ihre dichte Bebauung, geringen Luftaustausch und höhere Emissionen kommt es zur Bildung sogenannter städtischer Wärmeinseln: Wärme wird durch Gebäude, Straßen und andere versiegelte Oberflächen besser absorbiert, zudem wird sie durch erhöhte Verkehrsabgase und andere Emissionen in der Stadt gehalten, sodass die Abkühlung deutlich langsamer stattfindet als im ländlichen Umland.

³² Vgl. Simone Sandholz/Wolfram Lange/Udo Nehren, *Governing Green Change: Ecosystem-Based Measures for Reducing Landslide Risk in Rio de Janeiro*, in: *International Journal of Disaster Risk Reduction* 32/2018, S. 75–86.

³³ Auf Basis verschiedener Studien wird die Zahl an Todesopfern mit 1410 oder 7000 angegeben, vgl. Andy Haines et al., *Climate Change and Human Health: Impacts, Vulnerability and Public Health*, in: *Public Health* 7/2006, S. 585–596, hier S. 588; *United Nations Environment Programme, Impacts of Summer 2003 Heat Wave in Europe*, *Environment Alert Bulletin*, März 2004, S. 2, www.unisdr.org/files/1145_ewheatwave.en.pdf.

³⁴ Vgl. Anne Fouillet et al., *Excess Mortality Related to the August 2003 Heat Wave in France*, in: *International Archives of Occupational and Environmental Health* 1/2006, S. 16–24.

³¹ Siehe <http://cor.rio/institucional>.

Durch die vergleichsweise deutlich höhere Exposition stehen Städte besonders im Fokus der Risikoforschung. So gibt es beispielsweise Studien zu Berlin, Oberhausen und Leipzig, die sich explizit mit den Auswirkungen urbaner Hitze und möglichen Anpassungsoptionen beschäftigen.³⁵ Andere europäische Städte wie Wien haben bereits detailliert geplant, wie man etwa durch die Erhöhung des Wasseranteils die Entstehung städtischer Wärmeinseln und somit die Hitzebelastung für die Bevölkerung verringern kann.³⁶

Auch deutsche Städte berücksichtigen die Hitzethematik zunehmend in ihren Klimaanpassungskonzepten. Der Fokus liegt dabei aber allzu oft auf rein baulichen Maßnahmen, während soziale Faktoren seltener berücksichtigt werden. Ein Beispiel ist die Stadt Bonn, wo am 25. Juli 2019 mit 40,9 Grad Celsius die fünfthöchste jemals in Deutschland gemessene Temperatur dokumentiert wurde.³⁷ Die Stadt entwickelte zwar ein 2013 veröffentlichtes Klimaschutzkonzept und ist an mehreren Forschungsprojekten zur Klimaanpassung beteiligt, Daten über gesellschaftliche Verwundbarkeit liegen allerdings kaum vor oder werden bisher wenig berücksichtigt. Insbesondere gesundheitliche und soziale Verwundbarkeit wird vergleichsweise wenig in behördliche Planungsprozesse einbezogen.³⁸

Dabei ergab eine Haushaltsbefragung zum Hitzeempfinden, dass es (auch) in Bonn erhebliche Unterschiede bei der Exposition und der

Verwundbarkeit, speziell bei den Bewältigungskapazitäten zwischen verschiedenen Bevölkerungsgruppen gibt.³⁹ Senior:innen sind trotz geringer Exposition sehr verwundbar und am häufigsten von Herz-Kreislauf-Problemen betroffen, können sich aber bei Extremtemperaturen vergleichsweise gut auf nachbarschaftliche Hilfe verlassen. Dagegen sind sie weniger als jüngere Befragte bereit, individuell in Anpassungsmaßnahmen zu investieren. Gefragt nach verschiedenen Anpassungsoptionen gab es wiederum kaum Unterschiede zwischen den Befragten, wenig klimafreundliche Maßnahmen wie Klimaanlagen wurden bei zunehmendem Hitzestress ebenso in Betracht gezogen wie Begrünung oder andere naturbasierte Lösungen. Jüngere Befragte, insbesondere Student:innen, leben vergleichsweise häufiger in schlecht angepassten Wohnungen, die sich mehr aufheizen, und gaben häufiger Schlaf- oder Konzentrationsprobleme und Kopfschmerzen an als andere Gruppen. Darüber hinaus sind sie schlechter in ihre Nachbarschaft integriert. Solche Faktoren können aber entscheidend zur Bewältigung beitragen und werden in anderen Städten explizit gefördert, beispielsweise in New York, wo Nachbarschaftshilfe eine wichtige Komponente des städtischen „Beat the Heat“-Programms ist. Staatliche oder kommunale Maßnahmen fokussieren oft auf Ältere und Kinder als besonders verwundbare Gruppen und lassen das hohe Risiko anderer Bevölkerungsteile unberücksichtigt. Hier ist ein Umdenken nötig, damit Maßnahmen gezielter wirken und das Risiko, das von Extremtemperaturen ausgeht, reduzieren können.

Eine weitere Erkenntnis der Bonner Befragung war, dass sich im Fall einer Hitzewelle ein großer Teil aller Bevölkerungsgruppen auf Behörden und Hilfsorganisationen verlassen würde. Städtische Behörden sind aber entgegen der Wahrnehmung der Bevölkerung gar nicht für konkrete Hilfeleistungen im Notfall zuständig, und selbst die eigentlich zuständigen Hilfsorganisationen fühlen sich nur bedingt in der Lage, solche Extremsituationen mit ihren vorhandenen

35 Vgl. Nicole Mahlkow/Julie Donner, From Planning to Implementation? The Role of Climate Change Adaptation Plans to Tackle Heat Stress: A Case Study of Berlin, Germany, in: *Journal of Planning Education and Research* 4/2017, S. 385–396; Nicole Müller/Wilhelm Kuttler/Andreas-Bent Barlag, Counteracting Urban Climate Change: Adaptation Measures and their Effect on Thermal Comfort, in: *Theoretical and Applied Climatology* 1–2/2014, S. 243–257; Nicole Weber/Dagmar Haase/Ulrich Franck, Zooming into Temperature Conditions in the City of Leipzig: How Do Urban Built and Green Structures Influence Earth Surface Temperatures in the City?, in: *Science of the Total Environment* 496/2014, S. 289–298.

36 Vgl. Magistrat der Stadt Wien (Hrsg.), *Urban Heat Islands. Strategieplan Wien*, Wien 2015, S. 65.

37 Vgl. Peter Bissolli et al. (Anm. 4), S. 3.

38 Vgl. Simone Sandholz et al., *Erfahrungen und Bedarfe von Akteuren der Stadtplanung im Hinblick auf Vulnerabilität gegenüber Hitzestress: Ergebnisse einer Online-Umfrage bei deutschen Klein-, Mittel- und Großstädten, Zukunftsorientierte Vulnerabilitäts- und Risikoanalyse als Instrument zur Förderung der Resilienz von Städten und urbanen Infrastrukturen (ZURES), ZURES Working Paper 1/2017, S. 2–7.*

39 Vgl. hier und im Folgenden Simone Sandholz/Dominic Sett, *Erfahrungen und Bedarfe von Akteuren der Stadtplanung im Hinblick auf Vulnerabilität gegenüber Hitzestress: Ergebnisse einer Haushalts-Umfrage zum Hitzeempfinden in Bonn, ZURES Working Paper 2/2019.*

Kapazitäten problemlos zu bewältigen. Wenn die Verantwortung daher ausschließlich bei diesen Akteur:innen verortet und keine eigene Vorsorge getroffen wird, kann dies die Bewältigungsfähigkeit deutlich schwächen und somit zu einer erhöhten Verwundbarkeit führen.

WIE KANN DER UMGANG MIT WETTEREXTREMEN BESSER GELINGEN?

Wetterextreme können erhebliche negative Einflüsse haben, insbesondere dann, wenn sie ohnehin verwundbare und exponierte Personen oder gesellschaftliche Gruppen treffen. Nachhaltige Lösungsansätze bedürfen daher einer Betrachtung des gesamten Risikos, die über das einzelne (Natur-)Ereignis hinausgeht. Die Extremereignisse müssen dabei als Auslöser und nicht als alleiniger Grund für das Entstehen von Katastrophen betrachtet werden. Die Anpassung stellt nicht nur Stadt- und Regionalplanung vor zusätzliche Herausforderungen, sondern auch die Bürger:innen. Für ein umfassendes Risikomanagement ist es notwendig, alle Bevölkerungsschichten nicht nur in die Planungen einzubeziehen, sondern auch gezielt bei eigenen Anpassungsmaßnahmen zu unterstützen. Diese Unterstützung muss dabei jedoch über finanzielle Anreize hinausgehen, da zahlreiche Studien darauf hindeuten, dass die Entscheidung, ob und wie man sich an extreme Wetterphänomene anpasst, auch durch nicht-ökonomische Faktoren wie etwa die (individuelle) Wahrnehmung des Risikos beeinflusst wird.⁴⁰

Konkrete Anpassungsmaßnahmen sollten auf das jeweilige Katastrophenrisiko und die betroffenen Personen und Regionen zugeschnitten sein. Kernaufgaben sind dabei unter anderem klima-

angepasste Planung und Frühwarn- und Informationssysteme. Vieles davon existiert bereits, in Deutschland etwa Überflutungsgefahrenkarten, Apps, die auch vor Wetterextremen warnen, oder Informationsbroschüren zum Umgang mit Starkregen und anderen Ereignissen.⁴¹

Die wachsende Zahl und Intensität von Wetterextremen sowie deren differenzierte Folgen für verschiedene Bevölkerungsgruppen erfordern jedoch eine neue Kultur im Umgang mit diesen Ereignissen. Viele internationale Strategien wie das auf der Weltkonferenz der Vereinten Nationen 2015 verabschiedete Sendai Rahmenwerk für Katastrophenvorsorge haben dieses Umdenken bereits institutionalisiert und Ziele für ein inklusives Katastrophenmanagement entworfen. Immer mehr Studien in der Risikoforschung befassen sich zudem mit sozialen Aspekten. Es bestehen jedoch weiterhin erhebliche Forschungslücken, etwa im Bereich der Verhaltensforschung und bei der Frage, wie Risiko von der Bevölkerung wahrgenommen und verarbeitet wird. Die aktuell auch politisch zunehmende Bedeutung von Klimaschutz und Klimaanpassung in Deutschland sollte daher als geeigneter Augenblick verstanden und dazu genutzt werden, um langfristig zu einem besseren sowie nachhaltigem Risikomanagement bei Wetterextremen beizutragen und die Bevölkerung, Umwelt und Wirtschaft vor Schäden und Verlusten zu schützen.

⁴⁰ Vgl. Paul C. Stern, *Toward a Coherent Theory of Environmentally Significant Behavior*, in: *Journal of Social Issues* 3/2000, S. 407–424.

⁴¹ Vgl. etwa Stadtentwässerungsbetriebe Köln, *Überflutungsgefahrenkarten*, o. D., www.steb-koeln.de/hochwasser-und-ueberflutungsschutz/akutes-hochwasser/die-hochwassergefahrenkarte/die-hochwassergefahrenkarte.jsp; Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe, *Warn-App Nina*, 2019, www.bbk.bund.de/DE/NINA/Warn-App_NINA.html; *dass.*, *Ratgeber für Notfallvorsorge und richtiges Handeln in Notsituationen*, 17.1.2019, www.bbk.bund.de/SharedDocs/Downloads/BBK/DE/Publikationen/Broschueren_Flyer/Buergerinformationen_A4/Ratgeber_Brosch.pdf?__blob=publicationFile.

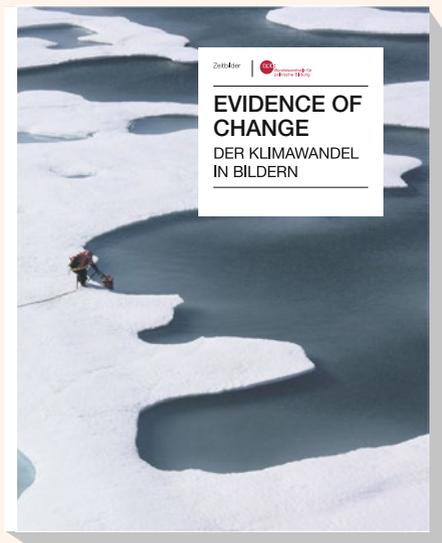
SIMONE SANDHOLZ

ist promovierte Geografin und Senior Researcher am Institut für Umwelt und menschliche Sicherheit der Universität der Vereinten Nationen in Bonn. sandholz@ehs.unu.edu

DOMINIC SETT

ist Masterabsolvent der Geografie und Junior Researcher am Institut für Umwelt und menschliche Sicherheit der Universität der Vereinten Nationen in Bonn. sett@ehs.unu.edu

Zum Weiterlesen.



2017
Bestell-Nr. 3986



2019
Bestell-Nr. 71947



2019
Bestell-Nr. 10467



Herausgegeben von der
Bundeszentrale für politische Bildung
Adenauerallee 86, 53113 Bonn
Telefon: (0228) 9 95 15-0



Redaktionsschluss dieser Ausgabe: 13. Dezember 2019

REDAKTION

Lorenz Abu Ayyash
Anne-Sophie Friedel
Johannes Piepenbrink (verantwortlich für diese Ausgabe)
Frederik Schetter (Volontär)
Anne Seibring
apuz@bpb.de
www.bpb.de/apuz
twitter.com/APuZ_bpb

APuZ
Nächste Ausgabe
1-3/2020, 6. Januar 2020

JEMEN

Newsletter abonnieren: www.bpb.de/apuz-aktuell
Einzelausgaben bestellen: www.bpb.de/shop/apuz

GRAFISCHES KONZEPT

Charlotte Cassel/Meiré und Meiré, Köln

SATZ

le-tex publishing services GmbH, Leipzig

DRUCK

Frankfurter Societäts-Druckerei GmbH & Co. KG,
Mörfelden-Walldorf

ABONNEMENT

Aus Politik und Zeitgeschichte wird mit der Wochenzeitung
Das **Parlament** ausgeliefert.
Jahresabonnement 25,80 Euro; ermäßigt 13,80 Euro.
Im Ausland zzgl. Versandkosten.
FAZIT Communication GmbH
c/o InTime Media Services GmbH
fazit-com@intime-media-services.de

Die Veröffentlichungen in „Aus Politik und Zeitgeschichte“ sind keine Meinungsäußerungen der Bundeszentrale für politische Bildung (bpb). Für die inhaltlichen Aussagen tragen die Autorinnen und Autoren die Verantwortung. Beachten Sie bitte auch das weitere Print-, Online- und Veranstaltungsangebot der bpb, das weiterführende, ergänzende und kontroverse Standpunkte zum Thema bereithält.

ISSN 0479-611 X



Die Texte dieser Ausgabe stehen unter einer Creative Commons Lizenz vom Typ
Namensnennung-Nicht Kommerziell-Keine Bearbeitung 3.0 Deutschland.



APuZ

AUS POLITIK UND ZEITGESCHICHTE

www.bpb.de/apuz