

Klimawandel und Wetterextreme: Ein Überblick

José L. Lozán, Siegmund-W. Breckle, Hartmut Grassl & Dieter Kasang

Was sind Wetterextreme?

Zu den häufigsten Wetterextremen gehören u.a. Hitze- und Kälteperioden, Hochwasserereignisse, tropische Wirbelstürme, Tornados und Schneestürme. Sie sind Bestandteile des »normalen« Wetters mit besonders starken Abweichungen vom Durchschnitt. Statistisch betrachtet sind Extremwerte in der Verteilung von Größen wie Temperatur, Niederschlag und Wind definitionsgemäß sehr seltene Ereignisse. Mit dem Klimawandel werden Verschiebungen in der Verteilung dieser Größen beobachtet, die dazu führen, dass bestimmte Wetterextreme häufiger werden. In *Abb. 1* wird dies am Beispiel der Temperatur gezeigt (Details im Kap. ULBRICH & NISSEN).

Wetter- und Witterungsextreme in der Geschichte

Durch Chroniken und andere Berichte sowie belegt durch erdgeschichtliche Befunde weiß man, dass Wetter- und Witterungsextreme mit verheerenden Folgen für Natur und Gesellschaft seit jeher aufgetreten sind. Einige wenige Beispiele, die sich tief in das kollektive deutsche Gedächtnis eingeschrieben haben, sind vor allem verheerende Stürme an der Nordsee-Küste und extreme Winter.

Mehrere Sturmfluten veränderten die Küstenlinien der südlichen Nordseeküste erheblich. Am 16. Januar 1219 ereignete sich die Erste Marcellusflut und am 16. Januar 1362 die Zweite Marcellusflut. Sie geschahen am Gedenktag des Heiligen Marcellus; daher Marcellusflut. Beide gehören bis heute zu den schlimmsten Naturkatastrophen, die die Nordseeküste je erlebt hat. Der Überlieferung zufolge sollen bei der ersten 16.000 und bei der zweiten Marcellusflut sogar 100.000 Menschen ihr Leben verloren haben. Große Teile fruchtbaren Landes zwischen Sylt und Eiderstedt in Nordfriesland sowie das sagenhafte Rungholt gingen unter. Viele der heutigen Inseln wie Sylt, Föhr und Amrum sowie die meisten Halligen und die Halbinsel Eiderstedt entstanden dabei oder erhielten ihre heutige Form, vor allem aufgrund der iso-statischen Landsenkungen. Im

Jahre 1277 brach der Dollart infolge der St. Stephans-Flut ein, wobei angeblich 33 Orte untergingen. Dollart und Jadedeichungen erreichten in der schweren Cosmas- und Damianflut von 1509 ihre größte Ausdehnung. Die Allerheiligenflut vom 1. November 1532 gehört ebenfalls zu den großen Schadensfluten. Sie richtete u.a. schwere Zerstörungen in den Elbmarschen an. Die Burchardiflut von 1634 führte zu verheerenden Auswirkungen in Nordfriesland.

Unter den strengen Wintern sind die von 1708/09 und 1739/40 hervorzuheben. Insbesondere gilt das für den erstgenannten Winter, der in großen Teilen Europas bis in den April hinein andauerte. Fast die gesamte Ostsee muss lange mit Eis bedeckt gewesen sein, ebenso der Bodensee. Auch Teile des Mittelmeerraums waren vom Frost erfasst. Dem strengen Winter 1739/40 folgten ein kaltes Frühjahr und ein kalter Sommer, so dass es in weiten Teilen Europas zu Missernten kam. Ab Mitte des 18. Jahrhunderts liegen dann direkte Temperaturmesswerte vor. Der strengste Winter der letzten 250 Jahre war der von 1829/30. Die Auflistung der strengen Winter in Mitteleuropa zeigt, dass die Beobachtung eines strengen Winters in Mitteleuropa 50 Jahre und mehr zurückliegt, dagegen sind heiße Sommer vorrangig in den letzten Jahrzehnten aufgetreten (Details im Kap. BÖRNGEN & DEUTSCH und Kap. MEIER).

Wetterextreme: Rolle des Strahlstroms (Jetstream)

Das arktische Klimasystem ändert sich derzeit drastisch und mit nahezu atemberaubender Geschwindigkeit (siehe: Warnsignal Klima: Die Polarregionen und Das Eis der Erde). Die Ursachen dafür sind die Klimaänderungen in der Arktis, die im Vergleich zum gesamten Globus verstärkt ablaufen, sie sind in ihrem Zusammenspiel noch teilweise ungeklärt. Es gibt derzeit intensive wissenschaftliche Diskussionen darüber, ob die arktische Klimaänderung auch einen unmittelbaren und nachweisbaren Einfluss auf das saisonale Wettergeschehen in den mittleren Breiten hat. In der Arktis, ausgelöst durch die globale Erwärmung, steigt die bodennahe Lufttemperatur mindestens doppelt so stark wie außerhalb der polaren Regionen an. Deshalb nimmt der Temperaturgradient zwischen der zentralen Arktis und den mittleren Breiten ab, wodurch sich die Intensität des ostwärts gerichteten Strahlstroms (Jetstreams) abschwächt (s. *Abb. 2*).

Es wird vermutet, dass es dadurch häufiger zu länger anhaltenden Kaltlufteinbrüchen aus nördlichen Richtungen bzw. zu Warmlufteinbrüchen aus südlichen Gebieten kommt (zunehmende blockierende Wetterlagen). Dies kann insbesondere in Europa oder Nordamerika, also auch außerhalb der Arktis, zu Wetterextremen führen (s. unten Omega-Wetterlage). Somit können arktische Klimaänderungen konkrete Fernwirkungen auf das Wettergeschehen in den mittleren Breiten haben (Telekonnektion). Ein

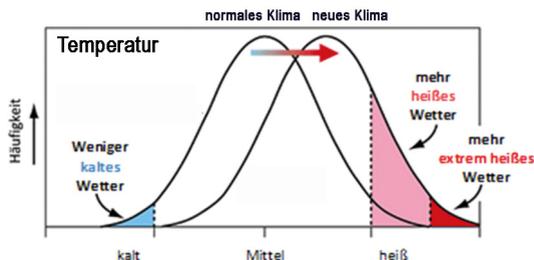


Abb. 1: Mit der Erderwärmung verschiebt sich die Temperatur-Verteilung von links nach rechts. Dadurch werden die Wetterextreme »Kälteperioden« auf der linken Seite weniger wahrscheinlich, während sich der Bereich für die Wetterextreme der rechten Seite vergrößert. Dadurch ist die Wahrscheinlichkeit für »Hitzeperioden« größer.



Abb. 2: Der Jetstream (Strahlstrom) ist ein globaler Starkwind (200-500 km/h) in 8-12 km Höhe (knapp unter der Tropopause) auf der Nord- und Südhalbkugel. Blau: Polarfront-Jetstream weht an der Grenze zwischen kalten (niedrigem Luftdruck) und warmen Luftmassen (hohem Luftdruck) über den mittleren Breiten. Rot: Subtropen-Jetstream weht über den Subtropen. Wie die Pfeile zeigen, ist die Richtung der Winde aufgrund der Corioliskraft von West nach Ost. Der Polarfront-Jetstream ist deutlicher ausgeprägt. Aufgrund der unregelmäßigen Grenze vor allem zwischen kalten und warmen Luftmassen sowie der Ablenkung durch die verschiedenen Gebirgsketten wie Rocky Mountains und Himalaya verläuft der Strahlstrom nicht geradlinig, sondern mäandriert. Quelle: https://study.com/cimages/videopreview/jet-streams-the-polar-front_01050805_169377.jpg (leicht geändert).

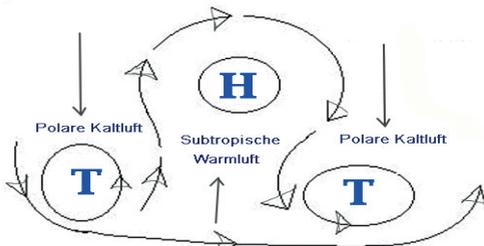
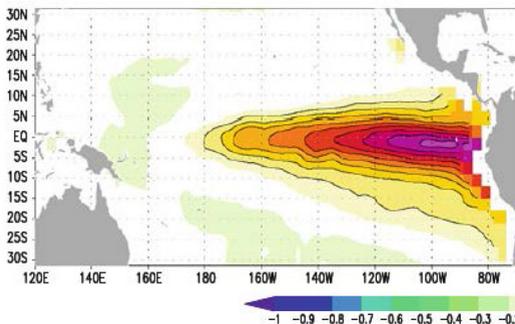


Abb. 3: Omega-Wetterlage. Ein Hochdruckgebiet flankiert durch zwei Tiefdruckgebiete.

a) El Niño



b) La Niña

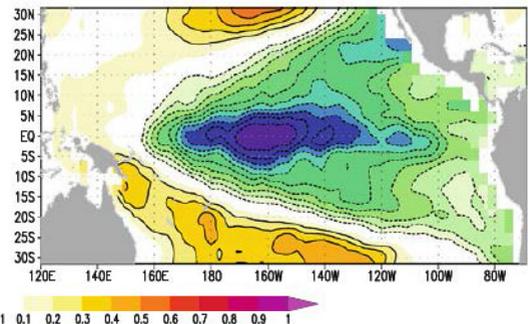


Abb. 4: Das typische El-Niño-Muster (a) und das typische La-Niña-Muster (b). Die Farbskala zeigt Temperaturdifferenzen in °C (Anomalie) (aus DOMMENGET et al. 2013).

wichtiger Grund für die Temperaturerhöhung in der Arktis ist die sich seit Jahren reduzierende Meereisbedeckung. Dadurch verringert sich die Rückstreuung von Sonnenenergie, und der Ozean speichert mehr Wärme im Sommer (Details im Kap. WENDISCH).

Ein Sonderfall ist die Omega-Wetterlage (auch Omega-hoch) (Abb. 3). Diese Bezeichnung hat mit dem so entstandenen Druckgebilde zu tun, das an den griechischen Buchstaben Omega erinnert. Es handelt sich um eine Wetterlage, die durch ein großes Hochdruckgebiet charakterisiert ist, das westlich und östlich von Höhentiefs flankiert wird (Abb. 3). Diese Konstellation kann zu jeder Jahreszeit sowohl in einem Hochdruck- als auch in einem Tiefdruckbereich auftreten und wahrscheinlich infolge einer Schwächung des Strahlstroms (s.o.) über vergleichsweise lange Zeiträume stabil bleiben – wie z.B. im Sommer 2018. Das kann die Ursache für die Zunahme von Wetterextremen (länger andauernde abnorme Temperaturen, lange Regen- oder niederschlagsarme Perioden) sein.

WETTEREXTREME: El-Niño/Southern Oscillation (ENSO)

El-Niño- und La-Niña-Ereignisse (Abb. 4) sind die beiden Extremphasen der ENSO (El-Niño Southern Oscillation). El-Niño-Ereignisse sorgen für sintflutartige Regenfälle über dem westlichen Südamerika und für außergewöhnliche Trockenheit auf der anderen Seite des tropischen Pazifiks (Indonesien und Teilen Australiens) (s. Broschüre Abb. 5). La-Niña-Ereignisse haben die umgekehrten Auswirkungen auf die Regenfälle in der Region. Die ENSO-Ereignisse verursachen fast weltweit auffällige Änderungen – sogar in weit entfernten Gebieten, etwa in der arktischen und antarktischen Meereisbedeckung. Die Rekordjahre der Erderwärmung sind meist auch El-Niño-Jahre gewesen (Details im Kap. LATIF).

HITZEWELLEN

Hitzewellen sind mehrtägige Ereignisse mit ungewöhnlich heißen Witterungsbedingungen. Sie treten meist im Hochsommer auf. Die erhöhte Wärmebelastung fordert eine stärkere Thermoregulation des menschlichen Körpers. Das ist im Allgemeinen für gesunde Menschen kein Problem, solange die körperliche Aktivität und das Verhal-

ten dabei angepasst werden und dem Körper ausreichend Flüssigkeit zugeführt wird. Bei kranken oder älteren Menschen kann die Thermoregulation eingeschränkt sein. Eine Überhitzung des Körpers kann Hitzekrampf, Hitzekollaps, Hitzeerschöpfung oder Hitzschlag und im schlimmsten Fall den Tod zur Folge haben. Hitzewellen beeinträchtigen auch die Natur und die Wirtschaft, da sie zu starkem Trockenstress in der Land- oder Forstwirtschaft führen können. Es steigt die Gefahr von Waldbränden, Hitzeschäden auf Fahrbahnen, Niedrigwasserständen an den Flüssen und der unzureichenden Kühlwasserversorgung von Wärmekraftwerken.

Hitzewellen werden unterschiedlich definiert. Am häufigsten ist die Definition über einen absoluten Schwellenwert. Eine Hitzewelle liegt in Mittel-Europa vor, wenn die mittlere Tagesmaximumtemperatur 5 Tage in Folge 30 °C überschreitet. Die Definition über einen relativen Schwellenwert wäre: Wenn die mittlere Tagesmaximumtemperatur 5 Tage in Folge über dem 95. Perzentil des Referenzzeitraums liegt.

In fast allen Regionen Europas hat mit Ausnahme der Britischen Inseln die Häufigkeit von Hitzewellen zugenommen. Besonders betroffen ist die Iberische Halbinsel, wo an mehr als 100 Tagen pro Sommer definierte Schwellenwerte überschritten werden. Auch in Ost-Europa ist aufgrund der stärkeren Kontinentalität eine höhere Anzahl an Hitzewellentagen die Regel. In einer Auswertung der stärksten Hitzewellen in Europa im Zeitraum 1950-2015 fallen sieben der 12 extremsten Hitzewellen in die Jahre nach 2000 (Bis 2018).

Hitzewelle Sommer-2003 in West- und Mitteleuropa

Der Sommer des Jahres 2003 brachte neue Rekorde der Lufttemperatur und zeichnete sich zudem durch lange Trockenheit aus. Die mittlere Sommertemperatur ergab für weite Teile West- und Mittel-Europas Temperaturabweichungen von über 3 °C gegenüber dem Mittelwert von 1961-1990. Die Hitzewelle 2003 forderte europaweit mindestens 70.000 zusätzliche Todesfälle (Abb. 6) (s. Broschüre Abb. 7). Diese hohe Zahl hängt auch teilweise damit zusammen, dass die Gesundheitssysteme nicht ausreichend auf Hitzewellen vorbereitet waren. Eine Analyse auf Basis von Proxy-Daten (Baumringe, Eisbohrkerne, u.a.) aus dem Jahr 2004 kam zu dem Ergebnis, dass der Sommer 2003 der heißeste Sommer seit mindestens 500 Jahren war. Die nächste starke Hitzewelle in Europa war im Sommer 2006, jedoch ohne regionalen Schwerpunkt. 2007 trat erneut eine stärkere Hitzewelle mit zahlreichen Todesopfern in Süd-Westeuropa auf. 2018 ist vor allem in Schweden und Griechenland aufgrund von Dürre und Bränden ein Katastrophensommer.

Hitzewelle Sommer-2010; Region um Moskau

Die Hitzewelle 2010 (Juli-September) war von historischem Ausmaß. Betroffen war in Russland, besonders die Region um Moskau und übertraf vielfach die Werte vom Sommer 2003. Durch die damit verbundene Trockenheit brachen zahlreiche Waldbrände aus (mehr als

30.000 Brandherde) (Abb. 8), was zu einer hohen Schadstoffbelastung führte. Die Zahl der zusätzlichen Toten wird mit 56.000 angegeben (Details im Kap. MÜTHERS & MATZARAKIS und Kap. SILLMANN & RUSSO).

Perspektive: Derartige Hitzewellen werden am Ende des 21. Jahrhunderts zur Normalität werden, wenn der Mensch weiterhin unvermindert fossile Brennstoffe verwendet und die Wälder und Moore zerstört. In einem zukünftigen wärmeren Klima werden Hitzewellen nicht nur häufiger auftreten; Dauer und Intensität werden sehr wahrscheinlich ebenfalls zunehmen. In dicht besiedelten Regionen, wie Indien, dem Osten der USA oder Südostasien, wird die Belastung der Menschen durch Hitzewellen noch zusätzlich durch erhöhte Luftfeuchtigkeit und Luftverunreinigungen insbesondere in Städten verstärkt, mit massiven Folgen für die menschliche Gesundheit (Details im Kap. KUTTLER).

DÜRREN

Dürren und Brände

Schon kurze Dürreperioden führen auch in Mitteleuropa zu einer erhöhten Waldbrandgefahr (Abb. 8). Im Mittelmeergebiet brennen inzwischen regelmäßig jeden Sommer größere Waldgebiete. Einerseits erhöht die Anhäufung trockenen organischen Materials die Waldbrandgefahr, andererseits sind aber auch die Sommer in den vergangenen Jahren heißer und trockener geworden. Wenn zudem – wie besonders in Portugal – vielerorts ausgedehnte *Eucalyptus*-Wälder angepflanzt wurden, ist die Gefahr verheerender Waldbrände noch erhöht. Zwar sind *Eucalyptus* und viele andere Arten aus Australien, wie auch die mediterranen Korkeichen und manche Kiefern recht feuerresistent, aber die zunehmenden Dürren führen zu immer häufigeren Bränden mit vielen Schäden an Häusern, Straßen und anderen Einrichtungen. Auch wenn viele Brände durch Brandstiftung entstehen, wird durch die zunehmende Dürre und die selbstverstärkenden Effekte bei Bränden deren Bekämpfung erschwert. 2017 gab es überdurchschnittlich viele Brände in den USA und Kanada sowie in Südeuropa (<http://www.klima-warnsignale.uni-hamburg.de/viele-braende/>).

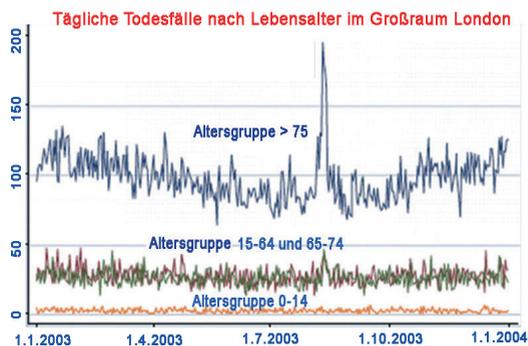


Abb. 6: Tägliche Anzahl an Todesfällen nach Lebensalter im Großraum London im Jahr 2003 (Quelle: KOVATS & HAJAT 2007 - geändert).

Dürre und Hunger in Ostafrika

In Ostafrika herrscht seit langem eine labile Nahrungsmittelversorgung. Diese schwierige Lebensmittelsituation wird durch lang anhaltende Dürren und komplexe soziale Konfliktherde mit vielen Akteuren verschärft. Hinzu kommt die hohe Anzahl an Personen in extremer Armut. Rund 50 Mio. Menschen leiden dort unter Hunger. Eine Bewältigung der Hungerkrise ist aufgrund mangelnder finanzieller Ressourcen sowie Korruption und Kriegen erschwert. Ende 2016 betrug der Anteil unterernährter Personen weltweit 11%. In der Region Subsahara liegen diese Werte bei 22,7% und im mittleren Afrika bei mehr als 25%. An der Spitze steht Ostafrika, wo über ein Drittel der Bevölkerung unterernährt ist. Im Jahr 2017 musste im Südsudan gebietsweise der Hungernotstand ausgerufen werden. Eine derartige humanitäre Katastrophe gab es zuletzt in Somalia 2011. Hinzu kommt die Vertreibung. Fruchtbare Felder werden nicht mehr bestellt und dadurch stehen noch weniger Nahrungsmittel zur Verfügung. Nach Angaben des *Food Security Information Network* (2017: 14) wurden 2016 in Somalia 2,1 Mio. Menschen vertrieben, im Südsudan über 3 Mio. (Details im Kap. KRAUSE & SCHICKHOFF). Nach monatelanger Dürre (Abb. 9) und Hungerphase war diese Region infolge starker Regenfällen (April 2018) durch schwere Überschwemmungen und Sturzfluten betroffen. Hunderttausende Menschen mußten vor allem in Kenia, Somalia und Äthiopien ihre Häuser verlassen. Sie flohen vor den steigenden Wassermassen. Fast 700.000 Menschen waren in Somalia von den Überschwemmungen der Flüsse Juba und Shabelle betroffen.

Wasserknappheit

Wasser ist nicht nur als Lebensmittel von grundlegender Bedeutung sondern auch die Grundlage für diverse wirtschaftliche Aktivitäten. Eine gesicherte Wasserversorgung ist für die Entwicklung eines Landes unabdingbar. Wenn z.B. Niederschläge über einen längeren Zeitraum niedrig sind oder ganz ausbleiben, werden die betroffenen Länder durch Dürren heimgesucht und die Gesundheit der Bevölkerung und die Produktion gefährdet.



Abb.8: Waldbrandbild Russlands 2010 (Foto: Global Fire Monitoring Center, GFMC, Freiburg)

Gefahr von Kriegen?

Ob Konflikte aufgrund von Wassermangel eskalieren oder eingedämmt werden können, hängt von vielen Faktoren ab. Politische Institutionen haben dabei einen besonderen Einfluss, da sie die beteiligten Länder dazu bewegen können, z.B. durch Anpassungsmaßnahmen Konfliktpotentiale abzubauen. Multilaterale Kooperationen, die z.B. ganze internationale Flusssysteme umfassen, eröffnen viele neue Möglichkeiten, den aktuellen Herausforderungen durch den Klimawandel zu begegnen. Ein großer Teil der Weltbevölkerung lebt heute in Regionen, die von ihrer geographischen Lage her nur eine begrenzte Wasserverfügbarkeit aufweisen. Werden in diesen Regionen die knappen Wasserressourcen auch noch intensiv genutzt, so ergibt sich eine akute Wasserknappheit. Zu diesen Regionen gehören Teile der USA, das südliche Europa sowie Teile Zentral- und Südasiens und Afrikas.

Konkurrenzsituationen um Wasser gibt es häufig in internationalen Flusssystemen arider und semi-arider Regionen, z.B. im Kurdengebiet. Weltweit gibt es 263 grenzüberschreitende größere Flüsse, deren Wassermengen die Lebensgrundlage für rund 40% der Weltbevölkerung darstellen. Für die allermeisten dieser Flusssysteme wurden mittlerweile Wasserabkommen abgeschlossen, die regeln, wieviel Wasser den einzelnen Anrainern zur Verfügung steht. Diese Regelungen bergen aufgrund von Klimawandel, Bevölkerungswachstum und Wirtschaftsentwicklung Konfliktpotential.

Fallbeispiel: Wasserverteilung am Nil

Der Blaue Nil und der Weiße Nil sind die beiden Hauptquellflüsse des Nils. Sie vereinigen sich bei Khartum im Sudan zum Nil. Der Blaue Nil entspringt in Äthiopien; er erhält sein Wasser aus den Niederschlägen des äthiopischen Hochlands und fließt durch den Sudan bis Khartum. Der Weiße Nil entspringt dagegen in den Bergen von Ruanda und Burundi und durchfließt Tansania, Uganda und den Süd-Sudan, Länder, die teilweise durch die Dürren der letzten Jahre betroffen waren. In jüngster Vergangenheit hat daher die Wassermenge des Weißen Nils abgenommen, die des Blauen Nils jedoch zugenommen, so dass die Ge-

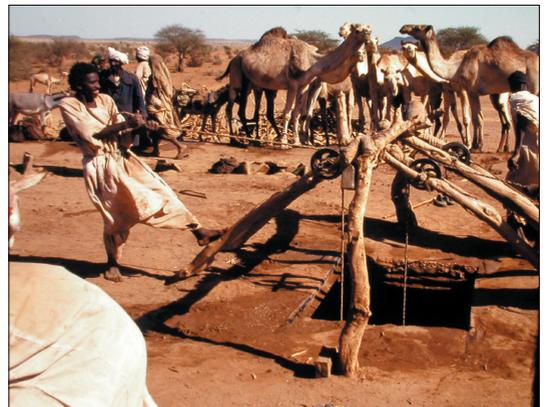


Abb.9: In vielen ariden und semi-ariden Regionen wird das Wasser zunehmend knapper Foto: M. Akthar-Schuster.

samtwassermenge des Nils mehr oder weniger unverändert geblieben ist. Die größer werdende Herausforderung in der Nilregion ist aber die stetig wachsende Bevölkerung. Etwa 232 Mio. Menschen lebten dort im Jahre 2010, bis 2025 könnten sie die Grenze von 300 Mio. überschreiten.

Insbesondere Ägypten ist völlig vom Nilwasser abhängig, 95% seines Bedarfs werden durch Flusswasser gedeckt, das hauptsächlich aus dem Blauen Nil stammt, da er in der Regel rund drei Viertel des Nilwassers bringt. Gemessen am Nil-Wasserabkommens von 1959 hat Äthiopien bislang sein Wasserkontingent nicht ausgeschöpft. Das wird sich ändern, wenn Äthiopien sein Grand Renaissance Damm-Projekt (der größte Staudamm Afrikas) fertig gestellt hat. Auch der Sudan hat bislang seinen ihm durch das o.g. Wasserabkommen zugesicherten Anteil nicht vollständig abgerufen, so dass Ägypten das vom Sudan nicht genutzte Wasser für sich in Anspruch nehmen konnte. Bei zunehmendem Eigenbedarf des Sudans wird der Anteil des Nilwassers, der Ägypten heute zur Verfügung steht, weiter abnehmen.

Diese o.g. Unsicherheiten könnten durch den Klimawandel noch erhöht werden, wenn die Niederschläge geringer werden. Die Prognosen sind bislang nicht eindeutig. Die Fertigstellung des o.g. Damms wird auf jeden Fall ein neues Wasserabkommen zwischen Ägypten, Sudan und Äthiopien notwendig machen. Der erste Schritt wurde 1999 durch die Gründung der »Nile Basin Initiative« gemacht. Ein solches Abkommen wäre eine Chance zu langfristiger Kooperation in der Region (Details im Kap. LINK).

HOCHWASSER UND ÜBERSCHWEMMUNG

Aufgrund der Erderwärmung sind die Meere gemessen am langfristigen Mittelwert 1901-2000 im globalen Durchschnitt um 0,7 °C wärmer geworden. Die Folge ist eine höhere Verdunstung. Ein Teil davon regnet über den Kontinenten ab. Dies trägt zu einer Intensivierung von Starkniederschlägen bei. Welche Regionen betroffen werden, ist von der atmosphärischen Zirkulation abhängig, die durch die Schwächung des Jetstreams beeinflusst wird. Mit den oft auftretenden Omega-Wetterlagen sind Hitzewellen und auch Hochwasser wahrscheinlicher geworden. In Deutschland sind die höchsten beobachteten winterlichen Abflüsse vieler großer Flüsse in den letzten Jahren um ca. ein Drittel gestiegen. Zeitreihen von Starkniederschlagsereignissen zeigen, dass die Häufigkeit und Intensität von beobachteten extremen Niederschlägen in Mitteleuropa zunehmen (Details im Kap. KUNDZEWICZ & HATTERMANN).

In den letzten Jahren gab es in Mitteleuropa fast jedes Jahr eine schwere Überschwemmung: Rhein-Maas-Gebiet (1993 u. 1995), Oder-Region (1997, 2010), Po-Gebiet (1994 u. 2000), Elbe und Donau (2002), Nebenflüsse der Elbe (2010 u. 2011), in mehreren Nebenflüssen der Donau (2005, 2013) und Rekordhochwasser in Elbe und Donaubecken (2006), Seine und Loire (2016 u. 2018) u.a.m.

Hochwasserrisiken in den Monsungebieten

Das Klima Süd- und Ostasiens wird durch den Asiatischen Monsun bestimmt. Die Dauer der Monsunsaison sowie die

Niederschlagsmenge und deren Variabilität haben einen tiefgreifenden Einfluss auf das Leben in dieser dichtbesiedelten Region. Unterdurchschnittliche Monsunregen führen zu Dürren und Hitzeperioden und überdurchschnittliche zu Überschwemmungen; dies gilt insbesondere für den Sommer-Monsun (ca. Juni-Sept.) (Abb. 10). Eine Intensivierung der Starkniederschläge wird aufgrund des erhöhten Feuchtigkeitstransports vom Ozean zum Land trotz einer Schwächung der Monsunzirkulation wahrscheinlicher. Neben den Treibhausgasen spielen dabei auch hohe Konzentrationen an Aerosolen in der Atmosphäre eine Rolle. Außerdem zeigen Modelle, dass der Monsunregen früher eintreten und sich später zurückziehen und sich damit die Dauer des Monsuns verlängern wird.

Der Monsun 2017 verursachte die schlimmsten Überschwemmungen der letzten 100 Jahre; sie forderten mehr als 1.400 Menschenleben, ein Drittel Bangladeschs war unter Wasser, die Nahrungsversorgung einer halben Million Nepalesen war gefährdet, mehr als 7.000 Schulen waren in einer wichtigen Zeit der Prüfungsphase beschädigt. Sturzfluten und Erdbeben in den Gebirgsregionen spülten Straßen und Autobahnen weg. Selbst der Lufttransport war wegen der Überschwemmungen unterbrochen. Wegen der fehlenden Energieversorgung wurden Hospitäler geschlossen. Das Risiko von Infektionen wie Malaria, Dengue und Chikungunya stieg auch nach dem Hochwasser an (Details im Kap. ZIMMERMANN-TIMM et al.). Aktuell sind in Südwest- und Zentral-Japan aufgrund heftiger Regenfälle über 200 Menschen ums Leben gekommen (12.7.2018).

STÜRME

Die Auswertung kontinuierlicher meteorologischer Zeitreihen zeigt, dass in den letzten 50-60 Jahren (d.h. seit den 1970er Jahren) die Sturmaktivität über dem Nordatlantik zugenommen hat. Beim Betrachten von längeren Zeiträumen ist jedoch bislang kein Langzeittrend erkennbar.

Extratropische Stürme sind Tiefdruckgebiete der gemäßigten und hohen Breiten, die Fronten aufweisen und einen Durchmesser von mindestens 200 km bis hin zu 2.000 km haben. Der Wind weht innerhalb der Tiefdruckgebiete aufgrund der Corioliskraft auf der Nordhalbkugel gegen den Uhrzeigersinn. Im Gegensatz zu tropischen Wirbelstürmen sind extratropische Stürme nicht von der Wassertemperatur der Meere abhängig. Stattdessen werden sie vom Temperaturunterschied zwischen den Luftmassen der hohen und der niederen geographischen Breiten beeinflusst (Detail im Kap. FESER & TINZ).

Vb-Wetterlage: Tiefdruckgebiete, die sich im Sommer über dem westlichen Mittelmeergebiet (Norditalien) bilden und danach nordöstlich bewegen, waren für die letzten schwersten Niederschlagsereignisse auf der Nordseite des Alpenraums und Mitteleuropas verantwortlich. Die Zugbahn eines Tiefdruckgebietes wird als Vb-Wetterlage (Fünf-B-Wetterlage, V = römisch 5) bezeichnet. Im Gegensatz zu den oben beschriebenen Tiefdruckgebieten über dem Nordatlantik werden sie vom warmen Mittelmeer beeinflusst (Detail im Kap. HO-HAGEMANN & ROCKEL).

Medicanes (aus *mediterranean* und *hurricane*) sind gelegentlich beobachtete Wirbelstürme mit einem Durchmesser von bis zu 300 km und mit einer hurrikanähnlichen Struktur über dem Mittelmeer. Im November 2011 wurde ein Medicane zwischen Mallorca und Korsika mit Windgeschwindigkeiten um 50 Knoten und Niederschlägen von >600 mm beobachtet. Todesfälle und viele Sachschäden wurden registriert (Details im Kap. CABOS & SEIN)

Tropische Wirbelstürme (TW)

TW entstehen über dem warmen Ozean (>26,5 °C) und werden je nach Meeresgebiet unterschiedlich benannt. Die sich im Nordwest-Pazifik nördlich des Äquators bildenden TW, heißen Taifune. Sie werden als Hurrikan bezeichnet, wenn sie im nördlichen atlantischen Ozean sowie im Nordpazifik östlich von 180° Länge entstehen. Im Indischen Ozean und im Südpazifik heißen TW hingegen Zyklone und vor der australischen Küste Willy-Willies.

TW gehören zusammen mit den Tornados zu den stärksten und zerstörerischsten Stürmen der Welt. Die Windgeschwindigkeiten der stärksten TW erreichen Werte bis 300 km/h und etwas darüber; immer noch deutlich weniger als die stärksten Tornados. Aufgrund ihres Durchmessers von einigen hundert Kilometern und einer Lebensdauer von mehreren Tagen erreichen die Schäden der TW jedoch weit größere Dimensionen als die der Tornados.

Die Hurrikansaison 2017 war die bis jetzt teuerste aller Zeiten. »Harvey« (Kategorie 4), »Irma« und »Maria« (beide Kategorie 5) tobten vier Wochen lang in der Karibik und Nordamerika und verursachten Schäden von 220 Mrd. US\$. Sie übertrafen die des bisherigen Rekordjahres 2005 (Gesamtschäden 163 Mrd. US\$). Harvey war bis jetzt der regenreichste Hurrikan. Der Staat Texas (USA) erlebte ein Hochwasser, das sich statistisch nur einmal in 1.000 Jahren ereignen sollte. Die Schäden beliefen sich auf 95 Mrd. US\$; damit war Harvey nach Katrina (August 2005) der zweitteuerste Hurrikan in den USA.

Der Orkan Ophelia erreichte als Ex-Hurrikan am 16.10.17 bei Irland die europäische Küste. Er entstand am 9.10.2017 im Ostatlantik nördlich von 30° N und wurde noch am 14.10. als Hurrikan der Kategorie 3 klassifiziert.



Abb. 10: Überschwemmungskatastrophe in Pakistan - 14 August 2010. Photo: © GYI NSEA – Stockphoto.

Am stärksten betroffen war Irland. Hunderttausende waren ohne Stromversorgung. Schulen blieben geschlossen und Flüge fielen aus. Ophelia, mit Windgeschwindigkeiten von bis zu 150 km/h, forderte drei Todesopfer. Mit »Vince« erreichte im Jahr 2005 seit über 160 Jahren ein Hurrikan die europäische Küste auf der iberischen Halbinsel. Am 31. August 2015 wurden die Kapverden von einem ost-atlantischen Hurrikan (Fred) heimgesucht, der erste seit 1892, als absolute Ausnahme (Details im Kap. KASANG et al. und Kap. KASANG & LOZÁN).

Der tropische Nordwest-Pazifik ist das Zentrum der Taifune; dort werden etwa ein Drittel aller global gezählten TW und mehr als 50% der TW der Kategorie 5 beobachtet. Der Supertaifun »Haiyan« (Abb. 12) traf mit einer Windgeschwindigkeit von weit über 300 km/h und Sturmböen von bis zu 380 km/h am 8.9.2013 auf die philippinische Insel Leyte mit einer Flutwelle von bis zu 7 m Höhe. Einher gingen Niederschläge zwischen dem 2. und 12. November von über 500 mm. Tacloban, die Hauptstadt der Insel Leyte wurde fast völlig zerstört. Insgesamt fielen ca. 6.000 Menschen dem Taifun zum Opfer, und die ökonomischen Verluste betragen nach Munich Re ca. 10 Mrd. US\$. Auch wenn diese gering erscheinen mögen, bedeuteten sie einen tiefen Einschnitt für Philippinen. Werte in Höhe von ca. 4% des Bruttoinlandsprodukts (BIP) wurden zerstört, nur rund 7% der Schäden waren versichert und können ohne eine zusätzliche Belastung der Bevölkerung oder des Staatsbudgets behoben werden. Neben den Philippinen werden China, Japan, Taiwan u.a. häufig durch Taifune heimgesucht. Dies macht deutlich, dass nicht nur Mittel- und Nordamerika sowie die Karibik Opfer von TW sein können.

Naturgewalt Tornado

Tornados sind heftig drehende Wirbel und gehören mit Windgeschwindigkeiten bis zu 500 km/h zu den schlimmsten Naturgewalten. In den USA treten rund 1.000 Tor-



Abb. 11: Orkantief *Friederike vom 18.1.2018 von Westen durch Irland, die Niederlande, Belgien und Deutschland bis nach Polen. Bei Windgeschwindigkeiten von 150 /200 km/h gab es 10 Todesopfer, über 60.000 Haushalte ohne Strom und hohe Sachschäden (NASA, public domain). Weitere Orkantiefs mit vielen Todesopfern: Xavier (Okt.2017), Kyrill (Januar 2007), Orkan Lothar (Dez.1999).

*Stürme heißen ab einer Windgeschwindigkeit von 117,7 km/h = 32,7 m/s = 64 kn Orkantiefs.

nados/Jahr auf; in Europa sind es etwa halb so viele. Direkte Messungen der Windgeschwindigkeit sind nicht möglich. Meteorologen verfolgten am 3. Mai 1999 einen starken Tornado in Oklahoma. Es gelang zum ersten Mal mit Hilfe eines Doppler-Radars im Zentrum des Rüssels die Windgeschwindigkeit zu messen. Abgelesen wurden rund 500 km/h. Die Lebensdauer eines Tornados kann zwischen einigen Sekunden bis mehr als einer Stunde betragen. Der Durchmesser variiert meistens zwischen einigen Metern (Windhosen) und einem halben Kilometer – selten über einem Kilometer.

Die Tornadostärken werden aufgrund der Schäden in fünf Kategorien (F1 - F5) klassifiziert. In Deutschland zählt man jährlich nach Angabe des Deutschen Wetterdienstes (DWD) zwischen 30 und 60 Tornados mit registrierten Schäden; Knapp 90% von ihnen gehören zur Kategorie »schwach« (F1). *Abb. 13* zeigt die Folgen nach einem F4-Tornado. Tornados können das ganze Jahr über auftreten. D.h. ein Tornado kann zu jeder Tages- und Jahreszeit irgendwo entstehen; die meisten Tornados sind allerdings eng mit dem Verlauf der warmen Jahreszeit und mit der Gewitterhäufigkeit gekoppelt, wenn sich feuchtwarme Luftmassen bis nach Mitteleuropa ausbreiten. Die Entstehung eines Tornados kann noch nicht genau vorhergesagt werden. Wetterdienste verbreiten jedoch kurzfristige Warnungen, wenn ein Verdacht auf die Bildung von Tornados vorliegt. Aufgrund ihrer kurzen Lebensdauer sind sie sehr schwer zu registrieren. Durch die Zusammenarbeit zwischen nationalen Wetterdiensten und Nichtregierungsorganisationen wie Skywarn können die Warnungen und der Schutz der Bevölkerung verbessert werden. Eine Zunahme von Tornados infolge des Klimawandels kann bis jetzt nicht nachgewiesen werden (Detail im Kap. LOZAN et al.).

HAGELSCHÄDEN

Hagel verursacht immer wieder erhebliche Schäden an Gebäuden, Fahrzeugen und landwirtschaftlichen Kulturen, die innerhalb von nur wenigen Minuten zu Kosten in Milliardenhöhe führen können. Hagel besteht aus ge-

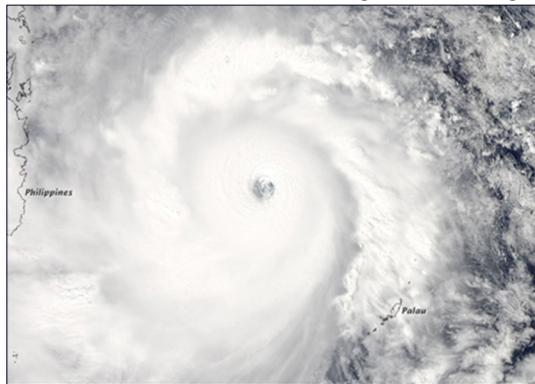


Abb.12: Satellitenbild von Supertaifun »Haiyan« vor den Philippinen (NASA 2013, public domain). Das Bild zeigt das typische Auge im Zentrum des Wirbelsturms. Das Auge ist ein relativ wolkenfreier und schwachwindiger Bereich, in dem kalte trockene Luft von oben herabsinkt.

frorenem Wasser mit vielen kleinen Lufteinschlüssen. Die Form der Hagelkörner ist sehr variabel. Definitionsgemäß hat Hagel einen Durchmesser von mindestens 5 mm; die Körner können manchmal aber auch die Größe von Tennisbällen erreichen. Hagel entsteht in Gewitterwolken von nur einigen Kilometern Ausdehnung bis hin zu aneinander gereihten Gewittern entlang von 1.000 km. Hagel ist in hohen Breiten selten und kommt in den Tropen nur in großen Höhen vor.

Mit Hilfe dreidimensionaler Radardaten wurde flächendeckend die Hagelhäufigkeit zwischen 2005 und 2017 in Deutschland bestimmt. Die Ergebnisse zeigen eine Zunahme der Hageltage von Norden nach Süden sowie einige lokale Maxima über und stromab von Mittelgebirgen mit bis zu drei Hageltagen pro Jahr und pro Quadratkilometer.

Durch den Klimawandel sind Hagelstürme häufiger zu erwarten; erste Arbeiten deuten generell auf mehr und intensivere Hagelstürme in einem sich erwärmenden Klima hin. Für Deutschland ergibt sich nach einem Hagelmodell (Ensemble aus sieben Regional Climate Models, RCMs) ein leichter Anstieg der Hagelwahrscheinlichkeit für die Periode 2021 bis 2050, wobei die Änderungen nur im Nordwesten und Süden Deutschlands statistisch signifikant sind (Details in Kap. KUNZ et al.).

HOCHWASSEREREIGNISSE UND HITZEWELLEN werden nachweislich häufiger

Zur Abschätzung des Wiederkehrintervalls von Wetterextremen wurde der Begriff »Jährlichkeit« eingeführt. Jährlichkeit (auch Annuität oder Frequenz) bedeutet die zeitliche Wiederkehrwahrscheinlichkeit eines Naturereignisses. Gemessen wird in Zeiteinheiten »pro Jahr« (1/Jahr). Beispielsweise 1/100 bedeutet ein Ereignis tritt einmal in 100 Jahren auf.

In *Tab. 1* werden Ergebnisse wissenschaftlicher Arbeiten aufgelistet, die auf der Grundlage langjähriger statistischer Analyse die Jährlichkeiten von Wetterextremen sowie ihre Veränderungen infolge des Klimawandels berechnet wurden. Sie zeigen, dass bestimmte Hochwasserereignisse in Frankreich, Großbritannien und in den USA sowie Hitzewellen aufgrund des anthropogenen Klimawandels häufiger auftreten (Details im Kap. FAUST).

FOLGEN FÜR NATUR UND GESELLSCHAFT

Wetter- und Witterungsextreme, wie sie in der Vergangenheit eher selten auftraten, könnten spätestens ab 2050 zur Normalität gehören. Wetterextreme wie länger anhaltende Dürren mit Waldbränden, Überschwemmungen und Hitzewelle sowie Missernten und Hungerperioden werden weiter zunehmen. Starke Hurrikane und Taifune sowie Tornados können noch häufiger werden. Reiche Länder können anscheinend die Kosten von Wetterextremen bis jetzt noch verkraften. Armere Länder wie Honduras, Haiti, Simbabwe, Südsudan, Somalia, Fidschi, Myanmar und die Dominikanische Republik werden sich erst nach Jahr-

zehnten erholen, wenn sie denn nicht erneut durch eine Naturgewalt heimgesucht werden. Der Migrationsdruck nach Norden wird steigen. Ferner wird das Abschmelzen von über jahrtausenden gewachsenen Gletschern und Eisschilden den Meeresspiegel um bis zu mehr als einen Meter ansteigen lassen, und Küstenregionen werden vor enorme Herausforderungen gestellt. Viele Regionen, z.B. im Nahen Osten, werden nicht oder nur unter großem Kühlaufwand bewohnbar bleiben (Details im Kap. HOFFMANN & SPEKAT).

In einigen Regionen, z.B. im Nahen Osten, lebt man bereits heute an der Grenze der Bewohnbarkeit. Beispielsweise lagen in Mogayra (Saudi-Arabien), Kuwait City und Jahra (Kuwait), Nasiriya, (Irak) und Minab (Iran) im Zeitraum 2010 bis 2018 die mittleren Tagestemperaturen im Sommer im Bereich von 43 °C. An manchen Tagen können Extremtemperaturen von über 50 °C herrschen, wie am 29. Juni 2017 in Ahwaz (Iran) mit einer Tageshöchsttemperatur von 53,7 °C oder am folgenden Tag in Basra (Irak) mit 53,9 °C. Temperaturen von mehr als 50 °C wurden 2017 auch im Oman sowie in den Vereinigten Arabischen Emiraten gemessen. Diese Angaben beziehen sich auf standardisierte Messungen in 2 m über den Boden. Bei Messungen direkt an der Erdoberfläche können noch höhere Temperaturen (>60°C) wie in der Wüste Dascht e Lut im Iran, im Death Valley, Kalifornien, in den Flammenden Bergen NW-Chinas, Timbuktu, Mali u.a. abgelesen werden. Derartige Werte sind auch im Mittelmeerraum und Nordafrika durchaus möglich. Problematisch werden hohe Temperaturen in Kombination mit hoher Luftfeuchtigkeit, da die thermische Belastung für den menschlichen Körper dabei steigt. Kühlmechanismen des Körpers, z.B. Schwitzen (Verdunstungskälte), werden limitiert, da die Umgebungsluft weniger Feuchtigkeit aufnehmen kann (Details im Kap. KRUMMENAUER & KROPP).

Die Bedingungen z.B. im Nahen Osten werden zunehmend durch extrem heiße Sommer charakterisiert. Im optimistischsten Fall also, wenn es der Klimapolitik gelingt, die globale durchschnittliche Erwärmung bis Ende des 21. Jh. auf nicht mehr als 2 °C zu begrenzen, muss die Bevölkerung im Nahen Osten in den Jahren 2070-2100



Abb.13: Verheerende Verwüstung der französischen Gemeinde Hautmont nach dem F4-Tornado vom 3.8.2008 (Wikipedia, public domain).

mit einer Zunahme der durchschnittlichen Sommertemperaturen um 2,5-3 °C rechnen. Im Falle einer eher pessimistischen Klimaentwicklung und eines Anstiegs der globalen Mitteltemperatur um 4 °C wird für die Region eine Zunahme der durchschnittlichen Sommertemperaturen um bis zu 8 °C projiziert. Man erwartet eine drastische Erhöhung der hitzebezogenen Krankheitsfälle und der hitzebedingten Mortalitätsrate (Details im Kap. KRUMMENAUER & KROPP).

Bei den globalen Gesamtschäden aus Naturkatastrophen (Erdbeben, Vulkanausbrüche, Stürme, Überschwemmungen und klimatologische Ereignisse) war das Jahr 2017 insgesamt das zweitteuerste Jahr seit 1980. Allein die Tornados Harvey, Irma und Maria verursachten im Jahr 2017 in der Karibik und Nordamerika Schäden von 220 Mrd. US\$. Mit 337 Milliarden US \$ an Gesamtschäden übertraf 2017 die Jahre 2005 (284 Milliarden US \$) und 2008 (257 Milliarden US \$) deutlich. Nur das Jahr 2011 (Schadenssumme 355 Mrd. US\$) war vor allem durch die Erdbeben in Japan und Neuseeland, großflächige Überschwemmungen in Thailand und eine sehr aktive Tornado-saison in den USA noch teurer (Details im Kap. Löw).

Extreme Wetterlagen haben in den letzten 20 Jahren zugenommen und führten in der deutschen Landwirtschaft zu einem Anstieg der Ernteschwankungen von Jahr zu Jahr. Überdurchschnittlich feuchte Jahre gab es u.a. 2002, 2007 und 2010 sowie Dürren 2003 und 2012. 2018 ist die Dürre europaweit. Allein in Niedersachsen werden in diesem Jahr 2 Mio. t Getreide weniger geerntet. Durch die Hitze wurde das Korn notreif (historisch früh). Insgesamt zeigen die beobachteten Extremwetterlagen wie Winterfröste, Spätfröste, Hitze, Dürren und zu nasse Bedingungen während der Saat- oder Erntephase ein sehr vielschichtiges Spektrum mit unterschiedlichen Auswirkungen. Zudem sind Monokulturen besonders anfällig. Extreme Wetterlagen treten oft nur sehr lokal auf, so dass sie nicht immer zuverlässig erfasst werden. Dementsprechend wenig lassen sich beobachtete Ertragsschwankungen durch lokale Extremereignisse erklären (Details im Kap. GÖMANN)

Mit Fortschreiten des Klimawandels werden sich die ökologischen, wirtschaftlichen und sozialen Probleme in einigen Ländern weiter verschärfen und möglicherweise zu Krieg, Vertreibung und Flucht führen. Nach den Äußerungen der EU-Kommission zu den Sicherheitsrisiken des Klimawandels muss Europa auf einen wesentlich erhöhten Migrationsdruck gefasst sein. Die Wanderungsbewegungen bleiben meist innerhalb südlicher Regionen etwa gleich; der Migrationsdruck nach Norden jedoch steigt. In Europa vor allem aus Subsahara-Afrika und der arabischen Welt, in Nordamerika aus der Karibik, Mittel- und Südamerika. Nach dem Klimarisiko-Index von Germanwatch kamen von 1997 bis 2016 insgesamt mehr als eine halbe Million Menschen durch mehr als 11.000 Extremwetterereignisse zu Tode. Allein 2016 gab es mehr als 6.000 Todesopfer, über 350 Mio. Menschen waren von den Auswirkungen betroffen. Die wirtschaftlichen Schäden sind besonders für arme Länder erheblich. (Details im Kap SCHEFFRAN).

Tab.1: Jüngere Fachveröffentlichungen zur Klimawirkungsaufklärung (aus Tropics-GEO 2016, E. Faust, Munich Re).

Schadenereignis	Schäden	Meteorologische Wiederkehrperiode (aktuell)	Rolle des Klimawandels
	Gesamt (original):		
August 2016: Extremniederschlag mit Überschwemmungen in Louisiana/USA ¹	10 Mrd. US\$	Ca. 30-jährlich (zentrale Golfküstenregion 29-31 N, 85-95 W)	Wahrscheinlichkeitszunahme mindestens Faktor 1,4
Mai/Juni 2016: Starkniederschlag mit Überschwemmungen in Frankreich ²	2,2 Mrd. €	Ca. 100-jährlich (Loire) Jährlichkeit >> 100 (Seine)	Wahrscheinlichkeitszunahme-Faktoren ca. 2,3 (Seine) und 2,0 (Loire)
Winter (Dezember) 2015: Starkniederschläge mit Überschwemmungen in Nordengland/Südschottland durch Wintersturm Desmond ³	0,88 Mrd. £	Ca. 100-jährlich	Wahrscheinlichkeitszunahme-Faktor ca. 1,4
Juli 2015: Hitze in Europa ⁴	30 Mio. €	3-Tage-Temperaturen Anfang Juli: De Bilt/NL (3-jährlich) Madrid/ES (5-jährlich) Mannheim/D (30-jährlich) Beauvais-Tillé/F (3-jährlich) Zürich/CH (13-jährlich)	Wahrscheinlichkeitszunahme mindestens Faktor 2

¹ Van der Wiel, K., S. B. Kapnick, G. F. van Oldenborgh, K. Whan et al. (2016): Rapid attribution of the August 2016 flood-inducing extreme precipitation in south Louisiana to climate change. *HESSD*, doi:10.5194/hess-2016-448.

² Van Oldenborgh, G.J., Philip, S., Aalbers, E., Vautard et al. (2016): Rapid attribution of the May/June 2016 flood-inducing precipitation in France and Germany to climate change. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.*, doi:10.5194/hess-2016-308.

³ Van Oldenborgh, G.J., Otto, F.E.L., Hausteijn, K., Cullen, H. (2015): Climate change increases the probability of heavy rains like those of storm Desmond in the UK – an event attribution study in near-real time. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.*, 12, 13197-13216.

⁴ Climate Central (2015): Climate change ups chances of Europe heat. <http://www.climatecentral.org/europe-2015-heatwave-climatechange>.

KLIMAWANDEL: WAS WIRD GETAN?

Es ist gibt keinen Zweifel mehr, dass vor allem der Mensch der Verursacher der aktuellen Klimaerwärmung ist. Auch die langsamen Klimaänderungen über Jahrtausende, die wesentlich durch die Änderungen der Umlaufbahn der Erde um die Sonne gesteuert werden, werden immer besser verstanden. Die abrupten Klimawechsel während der letzten Eiszeit, die als Dansgaard-Oeschger Zyklen oder Heinrich-Ereignisse sowie Schwankungen der Jüngerer Dryas bekannt sind, wurden entweder durch interne Schwankungen der Eisschilde oder durch Abschwächung des Nordatlantikstroms (»Golfstroms«) infolge einer drastischen Abnahme der Tiefenwasserbildung im Nordatlantik verursacht. Durch Abfließen großer Mengen angestauten Süßwassers während der Jüngerer Dryas-Zeit verringerte sich z.B. die Dichte des Meerwassers, so dass die Tiefenwasserbildung ausfiel und eine erneute Abkühlung auftrat.

Nach Prüfung aller möglichen Ursachen des aktuellen Klimawandels kommt für die Erhöhung der globalen Mitteltemperatur der letzten Jahrzehnte als einzige herausragende Ursache die Verstärkung des natürlichen Treibhauseffekts durch die Aktivität der Menschen in Frage. Seit Beginn der Industrialisierung verändert der Mensch die Zusammensetzung der Atmosphäre; die Konzentration der klimarelevanten Gase (CO₂, CH₄ und N₂O u.a.) ist viel

höher als vor 200 Jahren. Beispielsweise ist die CO₂-Konzentration von 280 auf über 400 ppm angestiegen (s. *Tafel 1* - Klappentext). Hauptquellen sind die Verbrennung fossiler Energieträger (Kohle, Erdöl und Erdgas) und die Zerstörung der Wälder und Moore, wodurch der dort gespeicherte Kohlenstoff freigesetzt wird.

Trotz internationaler Bemühungen steigt die CO₂-Konzentration in der Atmosphäre fast unvermindert weiter an. Im Jahr 2015 betrug die CO₂-Konzentration 400,8, 2016 404,2 und 2017 406,5 ppm. Von 2015 auf 2016 war der Anstieg mit 3,4 ppm die bis jetzt größte Zunahme innerhalb eines Jahres. Seit Beginn der Industrialisierung (280 ppm) entspricht der bisherige Anstieg der CO₂-Konzentration einer Zunahme um fast 45%. Der weltweite Wirtschaftsaufschwung hat die CO₂-Konzentration aufgrund der wachsenden Energienachfrage in Rekordhöhe getrieben. Die CO₂-Emissionen legten in den meisten Industrieländern im letzten Jahrzehnt mit Ausnahmen von Mexiko, Japan, Großbritannien und insbesondere den USA zu, wo es dank des verstärkten Beitrags erneuerbarer Energien und eines Umstiegs von Kohle auf Erdgas einen Rückgang gab. Die globale Mitteltemperatur lag im bisherigen Rekordjahr 2016 um 0,94 °C über dem langfristigen Durchschnittswert von 1901 bis 2000. Die sechs wärmsten Jahre wurden seit 2010 beobachtet. Insgesamt sind die Erfolge beim Klimaschutz sehr bescheiden (s. *Tafel 1-2* - Klappentext).

Mit dem Übereinkommen von Paris im Jahr 2015 hat die Weltgemeinschaft die Bedrohungen durch den anthropogenen Klimawandel erkannt, wenngleich manche Staatsführer sie wieder oder weiterhin leugnen oder nicht durchschauen. Global betrachtet wurde seitdem aber noch nicht genug getan, um die Temperaturziele und Treibhausgasneutralität in der 2.Hälfte des 21.Jh. erreichen zu können.

Das Klimaziel Deutschlands, bis 2020 die CO₂eq-Emissionen um 40% gegenüber 1990 zu reduzieren, ist kaum erreichbar. Nach dem letzten UNFCCC-Bericht lagen die deutschen Emissionen im Jahr 2016 bei 909 Mio. t CO₂eq. 1990 betrug die Kohlendioxidemissionen in Deutschland 1.251 Mio. t CO₂eq. Das entspricht einer Reduzierung im Zeitraum 1990-2016 von nur 27,3%. Eine Minderung um 40% bis 2020 bedeutet eine Emission von 751 Mio. t. Eine Reduzierung der Emissionen von 909 auf 751 Mio t CO₂eq. in 2,5 Jahren wird äußerst schwer sein. 2014 betrug die Emissionen 903 Mio. t und 907 Mio. t. CO₂eq im Jahr 2015. D.h. die Emissionen nahmen in den letzten zwei Jahren sogar zu. Insgesamt sind die beschlossenen Maßnahmen wenig effizient. Betrachten wir die Emissionen seit 1990, so betrug die Minderung im Zeitraum 1990-2000 – das waren die Jahre nach Schließung der DDR-Industrie – über 60% und in den folgenden Jahren 2001-2016 weniger als 40%. Besonders negativ ist die Entwicklung der Emissionen im Sektor Verkehr. Hier ist der Ausstoß gegenüber 1990 sogar gestiegen. Alle diese Zahlen sind politisch sehr enttäuschend, wenn man bedenkt, dass Deutschland einst Vorreiter im internationalen Klimaschutz war.

Man unterscheidet zwischen festen, flüssigen und gasförmigen fossilen Brennstoffen. Die CO₂-Emission aus festen fossilen Brennstoffen – z.B. Kohle – ist mit Abstand pro Einheit gewonnener Energie am höchsten. Durch die Verbrennung von Braunkohle werden rund 50 Mal mehr Treibhausgase freigesetzt als durch die Nutzung von Windkraft, um die gleiche Energiemenge bereitzustellen. Die Nutzung von Kohle ist die klimaschädlichste Form der Energiegewinnung. Neben der Kohlendioxidemission werden sowohl bei der Extraktion als auch bei der Verbrennung von Kohle viele Schadstoffe wie Quecksilber und Cadmium freigesetzt. Dadurch wird v.a. die Luft kontaminiert und die Gesundheit gefährdet (siehe Broschüre Tab. 2). Der Sachverständigenrat für Umweltfragen hat der Bundesregierung empfohlen, die alten Kohlekraftwerke sofort zu schließen und schrittweise den Kohleausstieg bis Ende 2030 durchzuführen, um die zukünftigen Klimaziele Deutschlands zu erreichen. Der Anteil erneuerbarer Energie des Strommix ist kontinuierlich von 14% im Jahr 2007 auf 38,5% im Jahr 2017 angestiegen. Als Strommix wird die anteilige Zusammensetzung des in Deutschland erzeugten Stroms nach Energiequellen bezeichnet. Deutschland exportiert Strom seit Jahren zunehmend mehr als es importiert. Im Jahr 2017 betrug dieser Überschuss rund 55 Terawattstunden (Twh). Durch alle Braunkohlekraftwerke werden jährlich 130 Twh erzeugt. Die Entwicklung von Stromspeichern muss umgehend und mit hoher Priorität vorangetrieben werden. Stromspeicher in Kombination

mit Nachfragemanagement sollen eine Balance zwischen Stromangebot und Leistungsnachfrage herstellen und eine gleichmäßige Versorgung gewährleisten (<http://www.klima-warnsignale.uni-hamburg.de/der-kohleausstieg/>).

Bisher glaubten die Hauptverursacher des Klimawandels, dass niemand ihnen ihre Mitverantwortung für die Folgen des Klimawandels nachweisen könnte. Inzwischen hat sich dies geändert. Großemittenten von Treibhausgasen können grundsätzlich für Schutzmaßnahmen gegen Klimaschäden zur Verantwortung gezogen werden. In einer anerkannten Datenbank werden die größten CO₂-Emitenten der Erde (Länder und Unternehmen) aufgelistet. 63 Prozent aller Industrieemissionen seit 1751 gehen auf nur 90 Quellen zurück. Pionierarbeit bei dieser Zusammenstellung leistete der US-Geograf Richard Heede.

Mit Unterstützung der Nichtregierungsorganisation Germanwatch verklagte der peruanische Andenbauer und Bergführer Saúl Luciano Lliuya im November 2015 den Energiekonzern RWE. Er verlangt von RWE die Übernahme von anteiligen Kosten (17.000 EUR) für Maßnahmen zum Schutz seines in der Bergregion Cordillera Blanca gelegenen Hauses. Das sind 0,5% von den 3,4 Mio. Euro Gesamtkosten, und sie entsprechen dem Anteil, den RWE an den globalen CO₂-Emissionen hat. RWE stößt jährlich rund 152 Mio. t aus. Das Haus liegt in der Stadt Huaraz unterhalb des Palcacocha Gletschersees. Aufgrund der durch den Klimawandel bedingten Gletscherschmelze droht ihm und einem großen Teil der Stadt bei einem Gletscherseebruch eine verheerende Flutkatastrophe, von der bis zu 50.000 Menschen betroffen wären. Schon während der mündlichen Verhandlung hatten die RichterInnen klar zu erkennen gegeben, dass Großemittenten wie RWE grundsätzlich gehalten sind, von Klimaschäden betroffene Menschen in ärmeren Ländern mit den Folgen des Klimawandels nicht allein zu lassen.

Inzwischen gibt es weltweit eine anschwellende Flut von Gerichtsverfahren mit klimarechtlichen Bezügen. Insgesamt zählt eine von dem *Sabine Center for Climate Change Law* der *Columbia Law School* herausgegebene Übersicht über 1.100 solcher Verfahren und Entscheidungen auf (Stand März 2018) (Details im Kap. FRANK et al.).

Bei dieser Entwicklung spielt die Unterstützung der Wissenschaft durch die in jüngster Zeit erzielten Fortschritte eine wichtige Rolle. Anhand von Modellrechnungen ist es jetzt möglich, den Anteil des anthropogenen Klimawandels an einzelnen Wetterextremereignissen nicht nur bei regionalen Wärmerekorden, sondern auch bei Überschwemmungen und Sturzfluten zu berechnen (Details im Kap. FAUST).

Heute wissen wir längst, dass unsere Lebensgewohnheiten das Weltklima vor allem durch die ungebremste Nutzung fossiler Energieträger verändert haben und weiter verändern. Ein Umdenken und sofortiges Handeln sind zwingend notwendig. Ohne einen konsequenten Klimaschutz ist ein Anstieg der globalen Durchschnittstemperatur um 3-4 °C mit verheerenden Folgen wie Wetterextreme unvermeidbar (Kap. HOFFMANN & SPEKAT)♦