Beitrag aus: Die Gebäudeversicherung Bern im Wandel der Zeit. Von der Brandbekämpfung bis zur Klimaforschung. Herausgegeben von GVB, Bern.
©Haupt Verlag, Bern, 2018. ISBN 978-3-258-08007-9

Der Klimawandel

Berner Forschung, globale Politik, lokale Herausforderungen

Thomas Stocker

In diesem Kapitel wird die Rolle der Berner Klimaforschung, deren Anfänge bis in das frühe 19. Jahrhundert reichen, erläutert. Die innovative Forschung an der Universität Bern und an anderen Institutionen in der Schweiz hat fundamentale Beiträge zum Verständnis des Klimasystems geliefert; sie bilden die wissenschaftliche Grundlage zum UNO Klima-Abkommen von Paris von 2015. Der Klimawandel ist auch in der Schweiz messbar und hat bereits zu sichtbaren Veränderungen geführt, die in Zukunft das Gesicht unseres Landes tiefgreifend verändern werden. Das Einhalten des vereinbarten Klimaziels erfordert die Dekarbonisierung, eine industrielle Revolution, in welcher Kohle, Öl und Gas durch erneuerbare Energien abgelöst werden. Dank ihrer Innovationskraft kann die Schweiz die Gelegenheit ergreifen, bei der weltweiten Dekarbonisierung eine führende Rolle zu übernehmen.

Die grossen Klimazyklen vor unserer Haustüre

Der Klimawandel erfordert ein ständiges Nachdenken entlang der Zeitachse. Veränderungen werden durch Messungen von Umweltindikatoren dokumentiert. Die gesellschaftliche Relevanz der Klimaforschung ergibt sich aber erst durch das Kombinieren der Vergangenheit mit der möglichen Zukunft. Der Fünfte Sachstandsbericht des UNO-Weltklimarats (IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change) hat deutlich aufgezeigt, dass das Klima durch den Menschen messbar verändert worden ist. Laut IPCC stellt der ungebremste Klimawandel ein grosses Risiko mit schwerwiegenden, weitreichenden und irreversiblen Folgen für Menschen und Ökosysteme dar.[1] Die überwältigende wissenschaftliche Evidenz hat alle Länder überzeugt, diesen Aussagen im Konsens zuzustimmen.

Doch blenden wir zunächst zurück auf dem Zeitstrahl der Erkenntnisse zum Klimawandel – die Wurzeln liegen in der Schweiz. Moränen, Hügelformationen und Findlinge sind das landschaftsprägende Element im Schweizer Mittelland. Sie sind Zeugen der letzten Eiszeit, und damit dokumentieren sie die lokalen Auswirkungen von weltweiten Klimaschwankungen. Eine zeitliche Einordnung gelingt mit der Analyse von Meeressedimenten, mit denen die Eiszeiten der letzten 5,4

1 Ausschnitt aus der Karte «Die Schweiz während des letzteiszeitlichen Maximums» der Schweizerischen Landestopografie. Bern und Umgebung lagen vor 20 000 Jahren unter einem etwa 400 Meter dicken Eispanzer.[3]

Millionen Jahre rekonstruiert werden können.[2] Die Forscher finden dabei 166 Phasen, während denen es weltweit im Mittel etwa 5°C kühler war. Die Auswirkungen waren dramatisch: Grosse Teile Nordamerikas und Skandinaviens sowie der Alpenraum waren periodisch vergletschert. In den letzten 800 000 Jahren folgten die Eiszeiten einem 100 000-Jahr-Rhythmus.

Der letzte Eiszeitzyklus hat auch im Berner Mittelland Spuren hinterlassen. Das hat schon früh Schweizer Naturforscher inspiriert, den Ursprung dieser Landschaftsformen zu ergründen. So präsentierte der Walliser Ignaz Venetz bereits 1816 an der Jahresversammlung der Schweizerischen Naturforschenden Gesellschaft in Bern seine Überlegungen zum Transport von Felsblöcken durch vorstossende Gletscher.[4; 5] Im selben Jahr war wegen des Ausbruchs des indonesischen Vulkans Tambora der Sommer in Europa äusserst kalt und feucht. Sofort schnellte der Getreidepreis in die Höhe, und eine Hungersnot war die Folge.[6] Dieses Ereignis zeigte den Naturforschern die möglichen dramatischen Auswirkungen einer Klimaverschlechterung. Venetz erkannte 1833 als Erster, dass mehrere Eiszeiten aufeinanderfolgten.[4] Nach anfänglicher, weitverbreiteter Skepsis gegenüber grossräumigen Gletschervorstössen verhalf der Freiburger Louis Agassiz 1840 der Eiszeittheorie zum Durchbruch.[7]

Die Bedeutung einer Eiszeit für die Landschaft können wir anhand der Ausdehnung des Aaregletschers begreifen (Abb. 1), der bis nach Bern reichte und dort überraschenderweise in den nordöstlich gerichteten Arm des Rhonegletschers mündete.[3] Das Ende der letzten Eiszeit begann vor etwa 18 000 Jahren: Der Aaregletscher zog sich so weit zurück, dass im Gletschervorfeld der Gerzensee entstand. In seinen Sedimenten finden sich Pollen von Bäumen – ein deutliches Zeichen von wärmeren Bedingungen.[8; 9]

Doch was war die Ursache dieser massiven Klimazyklen? Der Mathematiker Joseph Adhémar und der Geologe James Croll lieferten Mitte des 19. Jahrhunderts

plausible Erklärungen für die regelmässige Abfolge der Eiszeiten und ihre Periodizitäten.[5] Die Präzession und die Neigung der Erdachse sowie die Form der Erdbahn um die Sonne schwankten mit Perioden von 21 000, 42 000 und 100 000 Jahren.[10; 11] Milutin Milankovitch identifizierte 1941 die Änderung der Sonneneinstrahlung im Sommer auf 65° nördlicher Breite als Antrieb der Eiszeiten.[12]

Die Milankovitch-Theorie ist auch 2017 noch ein aktuelles Forschungsthema. Die Analyse von Meeressedimenten[13] und Eisbohrkernen aus der Antarktis[14] zeigt, dass in den letzten 800 000 Jahren der 100 000-Jahr-Zyklus zwar am stärksten hervortritt, aber dieser Schrittmacher der Sonneneinstrahlung ist relativ schwach. Die Ursache des prominenten 100 000-Jahr-Zyklus ist also immer noch nicht abschliessend erklärt.

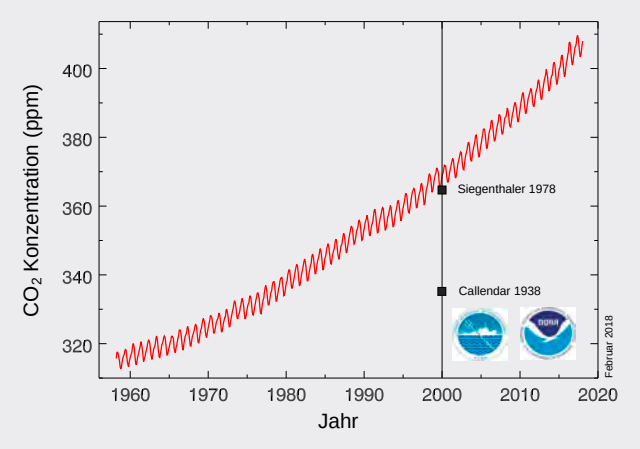
Spurengase in der Luft und ihre Klimawirkung

Anfangs des 19. Jahrhunderts wurde die Treibhaus-Wirkung von bestimmten Gasen in der Atmosphäre erkannt (siehe Kasten). Das neben Wasserdampf wichtigste Treibhausgas ist Kohlendioxid (CO_2). Heute kennen wir die Konzentration von CO_2 und seine Entwicklung über die letzten 60 Jahre sehr genau (Abb. 2). Die Messungen der CO_2-Konzentration, begonnen von Charles Keeling 1958 auf dem Mauna Loa in Hawaii, bilden aufgrund ihrer hervorragenden Präzision einen Eckpfeiler der Klimaforschung. Auch hier gibt es einen wichtigen Bezug zur Universität Bern. Keeling verbrachte sein Forschungssemester 1979–1980 am Physikalischen Institut der Universität Bern, was zu einem regen Austausch mit den damals tätigen Kollegen Hans Oeschger, Uli Siegenthaler und Bernhard Stauffer führte. Oeschger und Siegenthaler haben sich bereits damals intensiv Gedanken über die künftigen CO_2-Konzentrationen und ihre weitreichenden Konsequenzen gemacht.[15] Ihre Aussage, dass mit Hilfe von Modellen *eine maximal zulässige CO_2-Konzentration gefunden werden könnte, so dass die atmosphärische Strahlungsbilanz nicht in gefährlicher Weise gestört wird*, nimmt einen wesentlichen Teil

Der Physiker Joseph Fourier (1786–1830) erkannte bereits 1824, dass die Atmosphäre die Temperatur an der Oberfläche regelt.[17] Nach Fourier stellt die Atmosphäre für Licht (kurzwellige Strahlung) ein «kleineres Hindernis» dar als für Wärme (langwellige Strahlung).[5] Damit hat er die Essenz des natürlichen Treibhauseffekts der Erde prinzipiell korrekt beschrieben. Mit einem Spektrometer hat John Tyndall (1820–1893) die Absorption langwelliger Strahlung durch alle wichtigen Treibhausgase (H_2O, CO_2, N_2O, CH_4 und O_3) mit grosser Genauigkeit gemessen.[18] Er zeigte auch, dass O_2, N_2, und H_2 keine Treibhausgase sind, und folgerte richtig, dass Wasserdampf in der Atmosphäre das stärkste Treibhausgas ist.

Jacques-Joseph Ebelmen (1814–1852) vermutete, dass höhere Konzentrationen von CO_2 zur Erwärmung in früheren geologischen Epochen führten.[19; 20] Die Berechnung dazu lieferte der Schwedische Wissenschaftler Svante Arrhenius (1859–1927). Er schätzte die Abkühlung einer Eiszeit aufgrund der Veränderungen der Schneegrenze auf etwa 4 bis 5°C, verursacht durch eine 40% Reduktion der CO_2-Konzentration in der Atmosphäre.[21] Beide Schätzungen sind aus heutiger Sicht erstaunlich genau. Die ersten Messungen an Eisbohrkernen der Antarktis, die von Kollegen an der Abteilung für Klima- und Umweltphysik der Universität Bern Anfang der 80er-Jahre durchgeführt wurden, zeigten eine Reduktion der CO_2-Konzentration während der letzten Eiszeit von 35%.[22]

Im Jahr 1938 veröffentlichte Guy Stewart Callendar (1897–1964) eine Arbeit, in der er die Emissionen von CO_2 durch die Verbrennung von Kohle und Erdöl als Ursache für den Anstieg der Temperatur von 1880 bis 1935 identifizierte.[23; 24] Callendar schrieb bereits damals, dass zwar *wenige bereit wären zuzugeben, dass die Aktivitäten des Menschen irgendeinen Einfluss haben könnten auf ein Phänomen [das Klima und das Wetter] auf einer so ausgedehnten Skala.* Und er betont: *... ein solcher Einfluss ist nicht nur möglich, sondern geschieht zur jetzigen Zeit.* Die Arbeit schätzte für das Jahr 2000 eine CO_2-Konzentration von 335 ppm unter der Annahme einer jährlichen CO_2-Emission von 1.2 GtC (1 GtC = 1 Gigatonne Kohlenstoff = 1000 Milliarden Tonnen Kohlenstoff). Für das Jahr 2200 prognostizierte Callendar 458 ppm und bemerkte als positive Auswirkung, dass damit *die Rückkehr der tödlichen Gletscher auf unbestimmte Zeit hinausgezögert würde.*

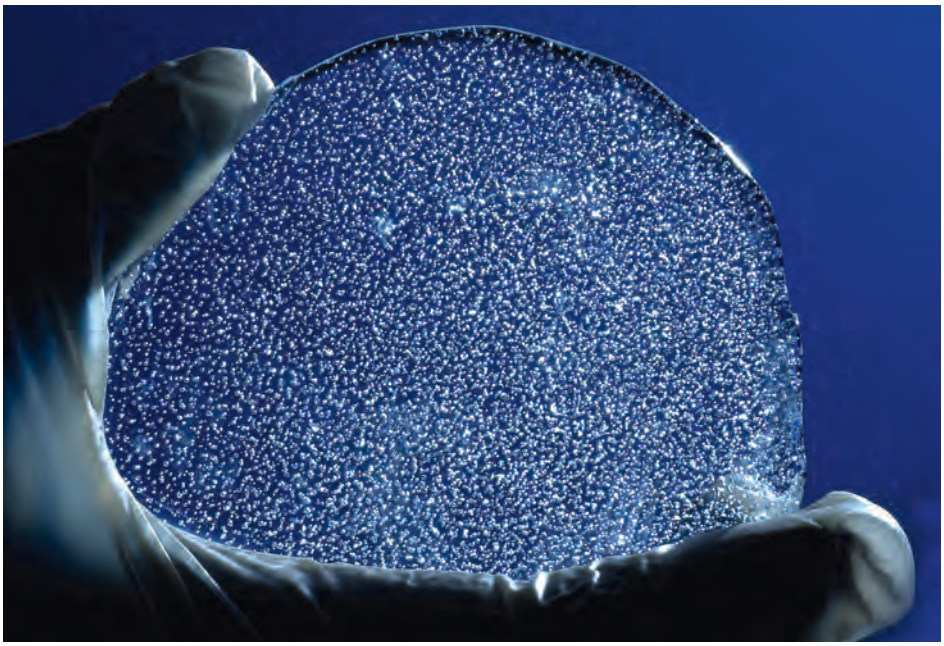


2 Anstieg der CO_2-Konzentration, gemessen auf Mauna Loa (Hawaii) seit 1958. Schätzungen von 1938 und 1978 der künftigen CO_2-Konzentrationen für das Jahr 2000 sind markiert.

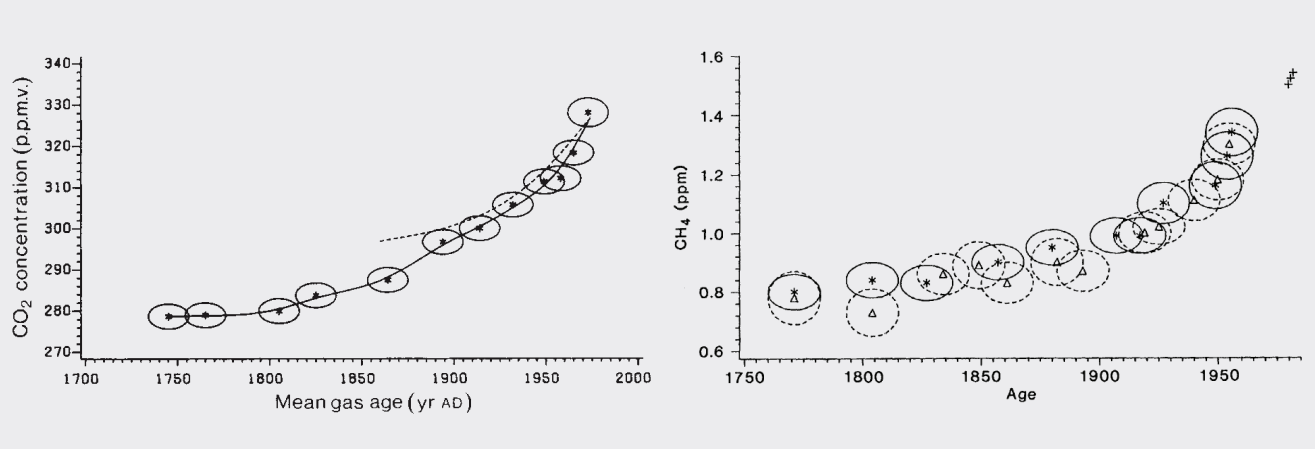
von Artikel 2 der UNO-Rahmenkonvention über Klimaänderungen vorweg.[16] In dieser Pionierarbeit finden sich auch Voraussagen über die atmosphärische CO_2-Konzentration: Die Abschätzung von 364 ppm für das Jahr 2000 ist erstaunlich genau. Die grundlegenden Prozesse des globalen Kohlenstoffkreislaufs waren den Berner Kollegen bereits 1978 recht genau bekannt.

Die «Keeling-Kurve» warf die Frage auf, ob bereits zu früherer, vor-industrieller Zeit ähnlich hohe CO_2-Konzentrationen vorlagen. Die Wissenschaftler der Abteilung für Klima- und Umweltphysik der Universität Bern haben diese Frage in den 1980er-Jahren erstmals beantwortet.[25; 26] Die Gruppe wusste von zahlreichen Vorarbeiten und Expeditionen mit dänischen und amerikanischen Kollegen, dass die Schlüsselinformation in den polaren Eismassen von Grönland und der Antarktis zu finden war. Im Eis entdeckten sie Bläschen, die Luft der Atmosphäre konservierten (Abb. 3).

Die eingeschlossene Luft enthielt auch die Treibhausgase CO_2 und CH_4 (Methan). Da diese Spurengase nur in sehr geringen Konzentrationen vorkommen, ist ihre Messung äusserst schwierig. Nach viel Entwicklungsarbeit gelangen dem



3 Scheibe eines Eisbohrkerns von Berkner Island (Antarktis) aus einer Tiefe von 120 Metern. Die Luftbläschen sind deutlich erkennbar.



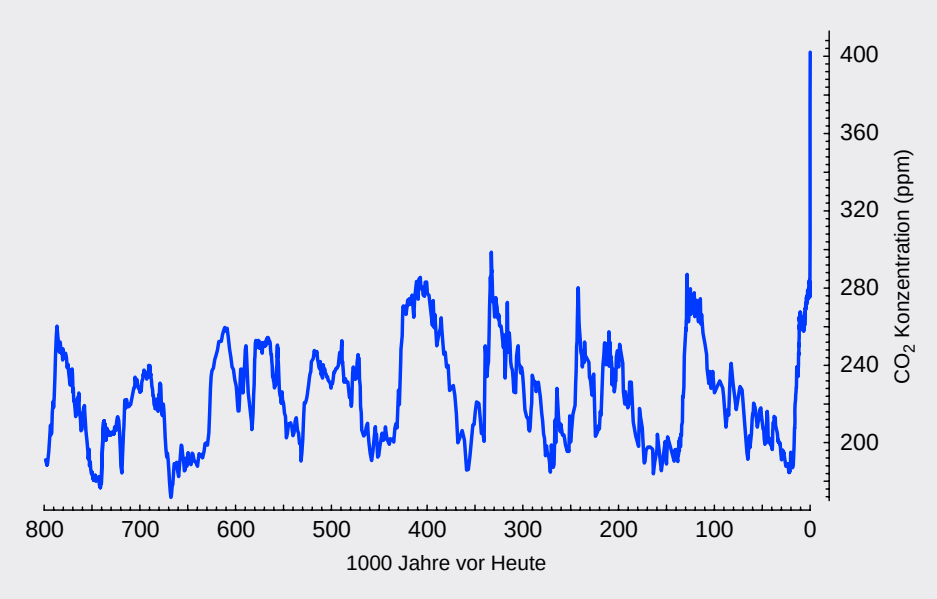
4 Der Anstieg von CO_2 (links) und CH_4 (rechts) seit Beginn der Industrialisierung wurde vom Team der Universität Bern bereits 1985 durch Messungen an polaren Eisbohrkernen eindeutig nachgewiesen. Die Messungen wurden am Eisbohrkern von Siple Station (Antarktis) durchgeführt.[25; 26]

Berner Team die Messungen. Sie zeigten in eindrücklicher Weise den Anstieg der beiden Treibhausgase seit der industriellen Revolution Mitte des 18. Jahrhunderts (Abb. 4). Die Ursache für den CO_2-Anstieg ist, wie bereits von Callendar 1938 festgestellt, die Verbrennung von Kohle, Erdöl und Erdgas sowie die Abholzung und Landnutzung. Für den Methan-Anstieg sind die Produktion von Energie, Abfall, Tierhaltung und Reisproduktion verantwortlich. Diese Studien lieferten den wissenschaftlichen Beweis, dass der Gehalt an Treibhausgasen aufgrund von menschlichen Aktivitäten in den letzten 250 Jahren zugenommen hat.

Die bisher letzte Tiefbohrung in der Antarktis erfolgte an der Station Dome Concordia im Rahmen des European Project for Ice Coring in Antarctica (EPICA) und erreichte 2004 eine Tiefe von 3270 m. An diesem Eiskern konnte das Berner Team CO_2 und CH_4 über die vergangenen 800 000 Jahre rekonstruieren.[27; 28] Diese Zeitspanne deckt die letzten acht Eiszeiten vollständig ab (Abb. 5). Die CO_2-Konzentration von 2017 ist über 30% höher als je zuvor in den letzten 800 000 Jahren. CO_2 war aber auch vor dem Eingriff des Menschen keineswegs konstant, sondern schwankte aufgrund natürlicher Prozesse zwischen etwa 174 und 300 ppm. Im Jahr 2016 wurde zum ersten Mal seit wahrscheinlich mehr als 2.5 Millionen Jahren die Konzentration von 400 ppm nicht mehr unterschritten. Ursache ist der Mensch, der mit der Verwendung fossiler Brennstoffe ein neues geologisches Zeitalter, das Anthropozän, eingeleitet hat.[29]

Überraschungen im Eisbohrkern von Grönland

Hans Oeschger und sein Team an der Universität Bern entdeckten auch Klimasignale direkt vor ihrer Haustüre. In Sedimenten des Gerzensees, die bis zur Zeit des Ausklingens der letzten Eiszeit zurückreichen, fanden sie Schwankungen der Isotopenkonzentration des Karbonats, die praktisch gleichläufig mit denjenigen der Eisschichten in Grönland waren. Isotope sind chemisch identische Moleküle, die sich einzig in ihrer Masse unterscheiden. Bei Phasenänderungen von Wasser zwischen festem, flüssigem und gasförmigem Zustand ändert sich die Isotopen-Konzentration in Abhängigkeit der Temperatur. Das ist die physikalische Grundlage des «Isotopenthermometers», das vom Dänen Willi Dansgaard 1964 beschrieben

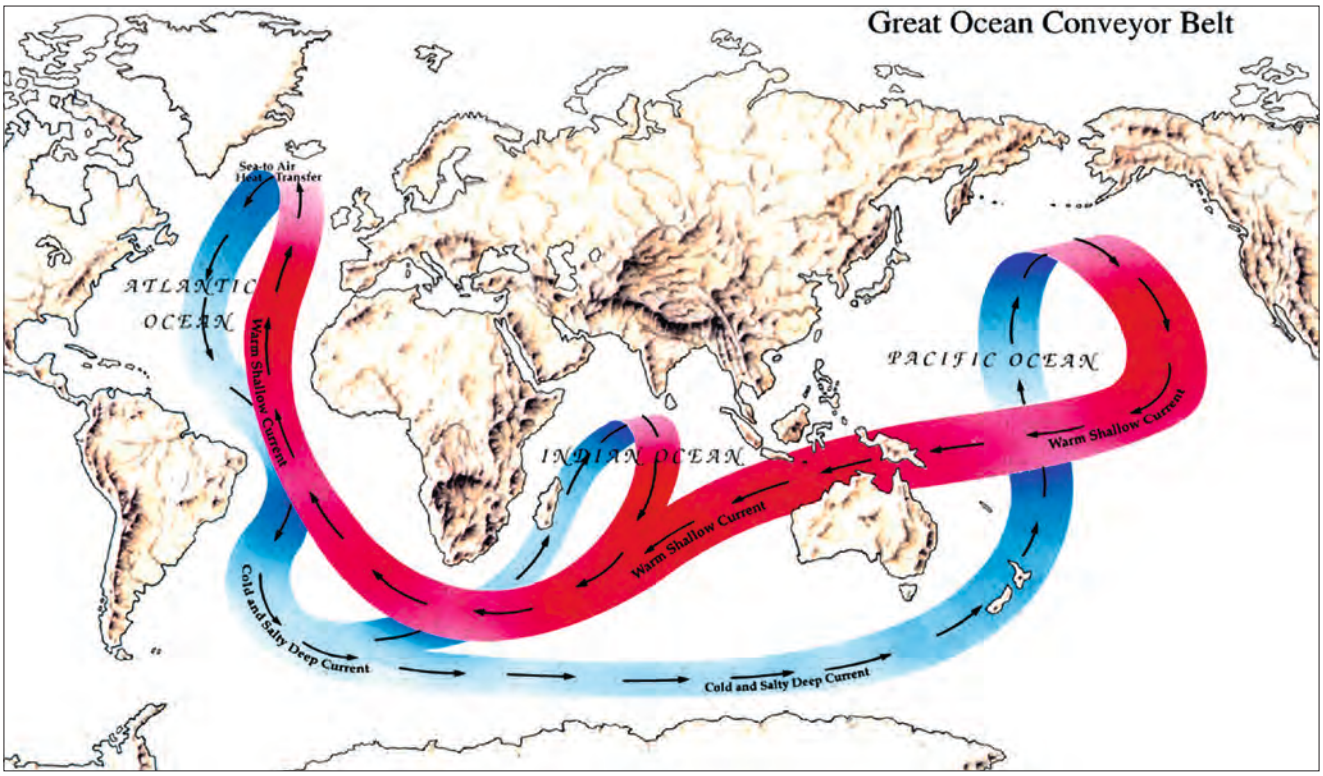


5 CO_2-Konzentrationen in der Atmosphäre über die letzten acht Eiszeitzyklen gemessen an verschiedenen Eisbohrkernen aus der Antarktis.[27] Ganz rechts in der Grafik ist der direkt in der Atmosphäre gemessene Anstieg von CO_2 nahtlos angefügt.[30] Dieser Anstieg ist verursacht durch die Verbrennung fossiler Brennstoffe und die Abholzung seit der Industrialisierung um 1750. Die CO_2-Konzentrationen übersteigen heute 400 ppm deutlich und sind damit über 30% höher als der höchste gemessene Wert in den letzten 800 000 Jahren.

wurde.[31] Ein Eiskern ist nichts anderes als abgelagerter Niederschlag; dessen Isotopenverhältnis zeichnet die Temperatur der Vergangenheit auf. Die Ähnlichkeit der Signale der Isotopenmessungen an Seesedimenten des Gerzensees und denjenigen aus dem grönländischen Eis waren offensichtlich. Das Team der Universität Bern entdeckte, dass die Klimaschwankungen in Grönland von grössräumiger, hemisphärischer Bedeutung waren.[32]

Die Forscher überraschte, wie schnell die Klimawechsel abliefen. Vor ungefähr 13 000 Jahren wurde eine anfängliche Warmphase durch eine Kaltphase abgelöst, in welcher plötzlich wieder alpine Flora am Gerzensee blühte.[9] Pollen von *Dryas octopetala* gaben dieser Kaltphase den Namen «Jüngere Dryas». Nach 1200 Jahren kam die Jüngere Dryas abrupt zu Ende. Oeschger und sein Team vermuteten die Ozeanzirkulation im Atlantik als Ursache für diese schnellen Wechsel. Simulationen mit vereinfachten Klimamodellen zeigten, dass diese Zirkulation tatsächlich mehrere Gleichgewichtszustände annehmen kann, die sich in der räumlichen Ausdehnung der Strömung, der Temperatur und dem Salzgehalt unterscheiden. Aufgrund dieser Eigenschaft kann die Zirkulation sehr schnell vom einen in den anderen Zustand kippen.[33] Da die Atlantische Zirkulation wesentlich am Wärmetransport nach Europa beteiligt ist – sie funktioniert quasi als gigantisches Förderband (Abb. 6) –, führt ein Abstellen zu einer abrupten Abkühlung; ein Anspringen des Förderbands verursacht eine Erwärmung. Heute weiss man, dass während der letzten Eiszeit 26 schnelle Erwärmungen stattfanden.[34] Diese werden als Dansgaard-Oeschger-Ereignisse bezeichnet.

Ein Abstellen des ozeanischen Förderbands hat sogar weltweite Auswirkungen. Das Förderband transportiert Wärme aus dem südlichen Ozean Richtung Nordatlantik. Wenn es zum Erliegen kommt, kühlt sich der nordatlantische Raum ab, und die Wärme verbleibt im südlichen Ozean, der sich dementsprechend langsam erwärmt. Dies kann mit einer thermischen Nord-Süd-Klimaschaukel verglichen werden.[36] Die Vermutung wurde schliesslich aufgrund eines Eisbohrkerns aus dem atlantischen Sektor der Antarktis eindrücklich bestätigt.[37]



6 Das Ozeanische Förderband, das für die milden Temperaturen in Europa verantwortlich ist. Stellt das Förderband ab, kommt es im nordatlantischen Raum zu einer massiven Abkühlung.

Solch abrupte Klimaschwankungen werfen grundsätzliche Fragen betreffend der Stabilität des Klimasystems auf: Könnte eine durch den Menschen verursachte Erwärmung ein Kippen der Ozeanströmung im Atlantik auslösen? Wäre das dann eine «gefährliche Störung» des Klimasystems?[15; 16] Die Berner Forschung befasste sich in den 1990er-Jahren weiterhin intensiv mit den Auswirkungen der Änderungen der Ozeanströmung auf das globale Klima. Die Forscher zeigten, dass die Stabilität der Atlantikzirkulation in Zukunft nicht nur von der absoluten Erwärmung abhängt, sondern auch von der Geschwindigkeit, mit der diese erfolgt.[38] Bei einer langsameren Störung kann das Überschreiten des Kipp-Punktes vermieden werden, da sich das komplexe System über eine längere Zeit anpassen kann. Es zahlt sich also aus, den Klimawandel früh zu bremsen!

Die Berner Forschung auf der klimapolitischen Weltkarte

Mitte der 1980er-Jahre wurde die Öffentlichkeit auf die ernsthafte Bedrohung durch den Klimawandel aufmerksam. In den Schweizer Medien hat Hans Oeschger damals schon vor den Folgen der menschgemachten Klimaerwärmung gewarnt. In Vorbereitung zum Rio-Erdgipfel von 1992 wurde im Jahr 1988 IPCC gegründet mit dem Auftrag, *die wissenschaftliche, technische und sozio-ökonomische Information, welche relevant für das Verständnis der wissenschaftlichen Basis des Risikos des von den Menschen verursachten Klimawandels, seiner möglichen Auswirkungen und der Optionen für Anpassung und Vermeidung, umfassend, objektiv, offen und transparent zu beurteilen.*[39] Seither trugen die Wissenschaftler der Abteilung für Klima- und Umweltphysik der Universität Bern in führenden Positionen zur Erstellung der fünf Sachstandsberichte bei (Tabelle 1).[40]

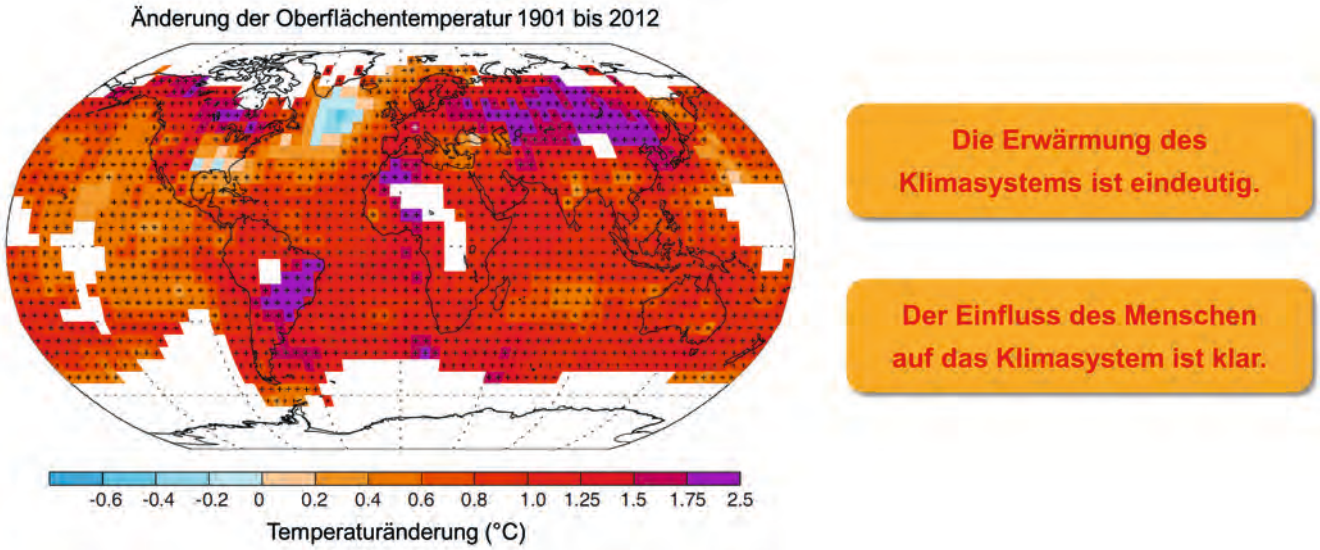
Name	Rolle	Quelle
First Assessment Report: ***Climate Change: The IPCC Scientific Assessment***		
Hans Oeschger	Haupt-Autor	Watson et al., 1990
Uli Siegenthaler	Haupt-Autor	
IPCC Climate Change 1994: Radiative Forcing of Climate Change and An Evaluation of the IPCC IS92 Emission Scenarios		
Uli Siegenthaler	Haupt-Autor	IPCC, 1995
Second Assessment Report: ***Climate Change 1995: The Science of Climate Change***		
Fortunat Joos	Haupt-Autor	IPCC, 1996
Third Assessment Report: ***Climate Change 2001: The Scientific Basis.***		
Fortunat Joos	Stellvertretender Vorsitzender der Arbeitsgruppe I	
Thomas Stocker	Koordinierender Haupt-Autor	Stocker et al., 2001
Fourth Assessment Report: ***Climate Change 2007: The Physical Science Basis***		
Fortunat Joos	Haupt-Autor	IPCC, 2007
Thomas Stocker	Koordinierender Haupt-Autor	Meehl et al., 2007
Fifth Assessment Report: ***Climate Change 2013: The Physical Science Basis***		
Thomas Stocker	Vorsitzender der Arbeitsgruppe I	IPCC, 2013a
Stefan Brönnimann	Haupt-Autor	IPCC, 2013b

Tabelle 1 Übersicht über die führenden Beiträge der Berner Klimaforscher an die Sachstandsberichte des IPCC seit 1990.

Die bisher höchste Führungsrolle eines «Berners» im IPCC war der Vorsitz der Arbeitsgruppe I «The Physical Science Basis», zu der ich, zusammen mit dem chinesischen Kollegen Qin Dahe, in mehreren geheimen Wahlgängen nach UNO-Regeln durch die Delegierten aller Länder gewählt wurde. Die Schweizer Nomination für den Vorsitz gründete auf einem Bundesratsbeschluss vom 18. Juni 2008, der auch die notwendigen finanziellen Mittel für ein Sekretariat garantierte. Die herausfordernde und vielschichtige Arbeit bestand aus der Festlegung des Inhalts des Berichts, der Wahl eines Teams von 260 führenden Wissenschaftlern aus aller Welt, darunter 11 aus der Schweiz, und dem Schreiben des umfassenden Berichts. Über 9200 Publikationen wurden in der Beurteilung berücksichtigt. In einem mehrstufigen Begutachtungsverfahren mussten 57 677 Kommentare zu den Entwürfen beantwortet werden. Der Fünfte Sachstandsbericht der Arbeitsgruppe I umfasst 1535 gedruckte Seiten, die den aktuellen Stand des Wissens über den Klimawandel wiedergeben.[41] Er bildet die wissenschaftliche Grundlage der historischen Pariser Vereinbarung zur Einschränkung des Klimawandels, die am 12. Dezember 2015 verabschiedet wurde.

Für die politischen Verhandlungen musste eine Zusammenfassung in möglichst einfacher Sprache verfasst werden. Dieses *Summary for Policymakers* wurde an einer viertägigen Plenarversammlung des IPCC Wort für Wort verhandelt.[42] Nur konsensfähiges Material überlebte in diesem Dokument. Das Schreiben war eine grosse Herausforderung für die Autoren: In einem eigentlichen Destillationsprozess wurden die 1535 Seiten auf 27 Seiten verdichtet. Neben den üblichen Elementen wurden neu Hauptaussagen, sogenannte *Headline Statements*, eingeführt (Abb. 7).[43] Beispiele dafür sind: *Die Erwärmung des Klimasystems ist eindeutig* sowie[2] *Der Einfluss des Menschen auf das Klimasystem ist klar,* Sätze, die im Wortlaut von allen Ländern verabschiedet wurden. Das verleiht diesen Aussagen das entsprechende politische Gewicht. Die 19 Hauptaussagen des Summary for Policymakers haben auf zwei gedruckten Seiten Platz. Sie wurden wegen ihrer Zitierfähigkeit besonders von den Medien und Politikern geschätzt!

Die wichtigste, politikrelevante Erkenntnis des letzten IPCC-Berichts ist die Tatsache, dass die Erwärmung im 21. Jahrhundert nahezu proportional zur Gesamt-



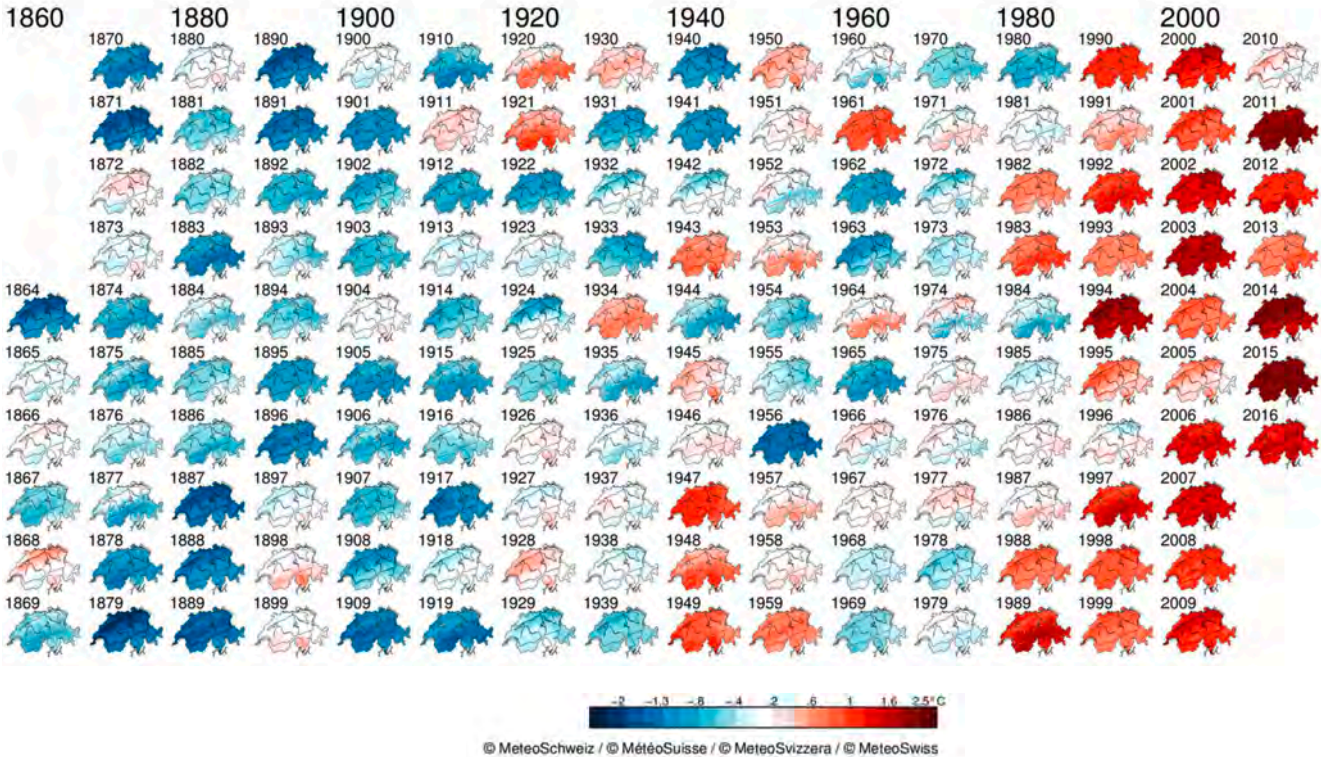
7 Die Erwärmung der Erde von 1901 bis 2012 in Grad Celsius und zwei der Hauptaussagen des Klimaberichts der Arbeitsgruppe I des IPCC.[42] Die Version der Figur, die an der Plenarsitzung des IPCC vom 23. bis 27. September 2013 vorgestellt wurde und hier abgebildet ist, wurde nach einer winzigen Änderung akzeptiert: das weisse Pluszeichen in Zentraleuropa (!) musste, wie alle anderen, schwarz gefärbt werden.

menge CO_2 ist, die seit der industriellen Revolution in die Atmosphäre ausgestossen wurde. Das Konzept der sogenannten kumulativen CO_2-Emissionen verknüpft auf globaler Skala die menschliche Aktivität direkt mit der Klimaänderung. Die Relevanz für die Politik ist offensichtlich: Wenn eine bestimmte globale Erwärmung mit einer Gesamtmenge CO_2 verknüpft ist, dann impliziert ein Klimaziel – zum Beispiel 2°C oder 1.5°C, wie von der Pariser Vereinbarung festgelegt – direkt ein Budget von CO_2-Emissionen. Da dies ein globales Budget ist, stellt sich die Frage, wem wie viel des noch verbleibenden CO_2-Budgets zusteht. Von 1850 bis 2011 wurden 52% der gesamten CO_2-Emissionen von Europa und den USA zusammen verursacht.[44] Der Anteil Chinas an den kumulativen Emissionen beträgt in diesem Zeitraum nur gerade 11%. Die Emissionsanteile vom Jahr 2015 verdeutlichen hingegen die enorme Entwicklung, die die Länder hinter sich haben: China ist mit 29,5%, die USA und die EU zusammen sind nur noch mit 24% am Gesamtausstoss beteiligt; Indien trägt 6,8% bei.[45] Dies zeigt die grosse Dynamik in der Entwicklung von Ländern und Regionen nach 1990.

Die politische Relevanz des CO_2-Budgets erklärt auch, warum um diesen Paragrafen im Summary for Policymakers an der Plenarversammlung der Arbeitsgruppe I vom 23. bis zum 27. September 2013 in Stockholm am längsten und härtesten gerungen wurde. Ein ganzer Tag und eine ganze Nacht waren notwendig, um auch noch die letzten Länder von dieser Erkenntnis zu überzeugen. Die Klimaforschung, mit einem wesentlichen Beitrag der Berner Kollegen, hat damit, nach 26 Jahren Arbeit und fünf umfassenden IPCC-Berichten, die allgemein akzeptierte wissenschaftliche Grundlage geschaffen, auf welcher die Pariser Vereinbarung zustande kam.

Die Schweiz ist keine Klima-Insel

IPCC hat die global gemittelte Erwärmung von 1880 bis 2012 mit 0,85°C angegeben.[42] Inzwischen ist die Temperatur weiter angestiegen, und die Jahre 2014, 2015 und 2016 waren die wärmsten seit Beginn der global gemittelten Zeitreihe im Jahr 1880.[46] Für die Nordhemisphäre ist die mittlere Temperatur seit 1880 bereits um 1,08°C angestiegen. Von 1864 bis 2012 wurde es in der Schweiz gar um 1,75°C

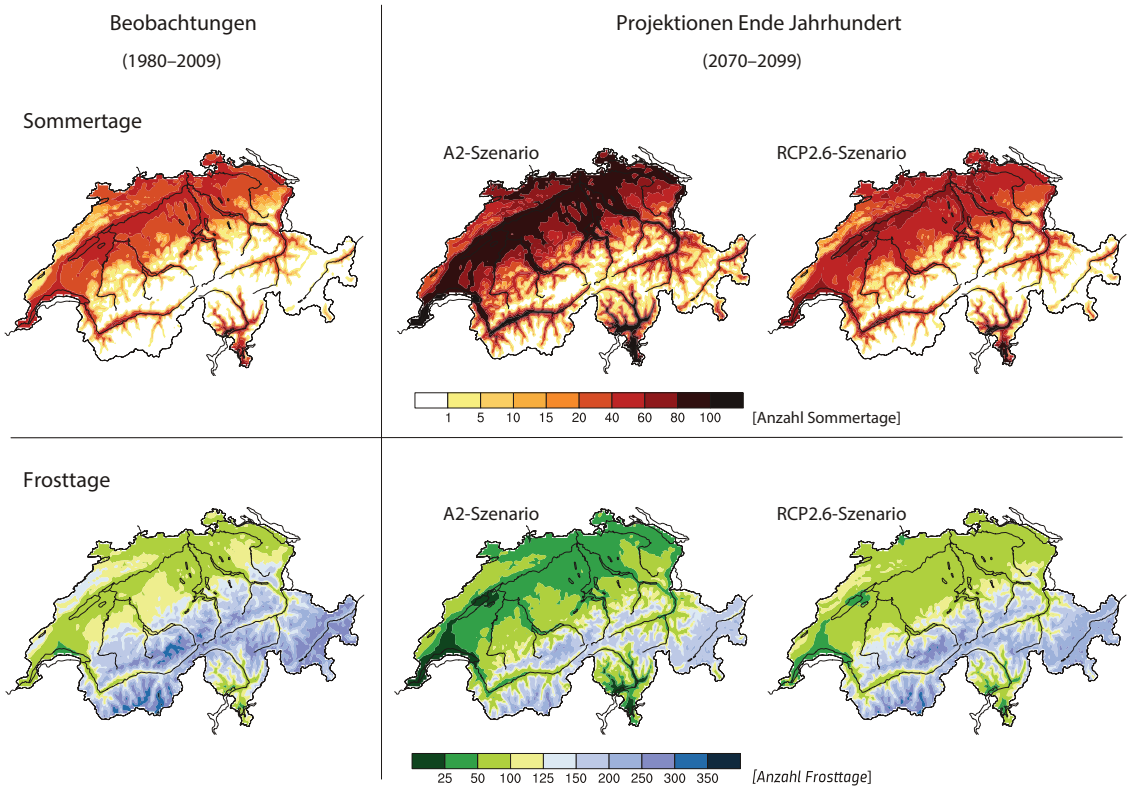


8 Illustration der Erwärmung in der Schweiz. Entwicklung der Abweichung der Jahresmitteltemperatur der Schweiz gegenüber 1961–1990 über die letzten 152 Jahre.

wärmer (Abb. 8).[47] Die kontinentale Lage und die rückläufige Schnee- und Eisbedeckung verstärken die Erwärmung in der Schweiz.[48] Auch der Wasserkreislauf ändert sich. Zwar zeigen die Niederschläge nur an sehr wenigen Stationen signifikante Tendenzen,[49] doch ist eine deutliche Zunahme von Starkniederschlägen im Winter feststellbar.[49,50]

Seit etwa 1980 ist die Schneebedeckung in der Schweiz unterhalb von 1300 m.ü.M. deutlich zurückgegangen.[51] Auch fällt der Niederschlag immer weniger häufig als Schnee, und die Wintersaison hat sich gegenüber 1960 verkürzt.[52] Die Auswirkungen auf den Wintertourismus in der Schweiz sind spürbar.[53] Auch die Gletscherfläche in der Schweiz hat deutlich abgenommen: von 1973 bis 2010 um über 27%.[54] Die Statistik von Extremereignissen zeigt ebenfalls bereits messbare Veränderungen: Starkniederschläge nahmen zu, und die Länge der Hitzewellen hat sich in Europa seit 1880 verdoppelt.[55]

Zwar ist die Schweiz vom Anstieg des Meeresspiegels nicht direkt betroffen, jedoch von den anderen Aspekten des Klimawandels. Dank dem dichten Messnetz der Schweiz sind wir frühzeitig informiert, wie der Klimawandel bei uns fortschreitet und wo kritische Situationen auftreten können, wie zum Beispiel im auftauenden Permafrost.[56] Die Herausforderungen und Gefahren sind für Gemeinden und Kantone sehr unterschiedlich. Beispielsweise nehmen Elementarereignisse in ihrer Häufigkeit und Intensität zu und bilden ein steigendes Schadenspotenzial für die Volkswirtschaft. Einfache Risikoabschätzungen aufgrund der langjährigen Erfahrungen sind nicht mehr zuverlässig, da sich ein völlig neues Klimaregime mit anderen Statistiken entwickelt. Deshalb sind regelmässig nachgeführte lokale und regionale Klimaszenarien als Entscheidungshilfen unabdingbar.[57] Die Schweizer

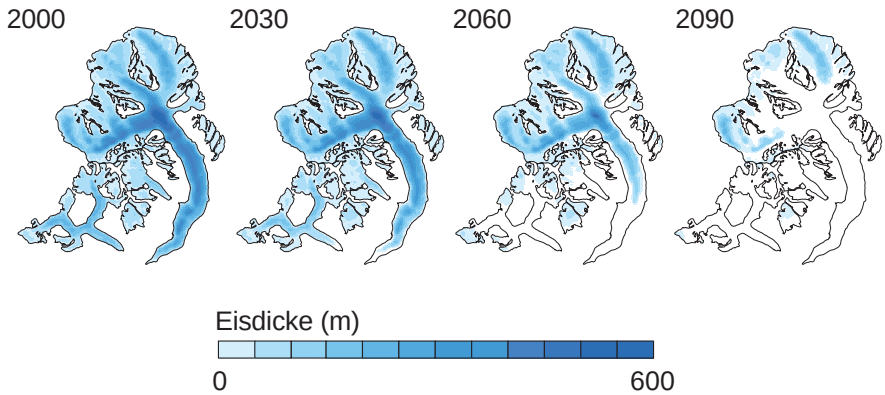


9 Heutige und mögliche künftige Anzahl Sommertage ($T_{max} > 25°$) und Frosttage ($T_{min} < 0°$) in der Schweiz für ein Klimawandel-Szenario (A2) und ein Klimaschutz-Szenario (RCP2.6).

Klimaforschung arbeitet gegenwärtig an einer Aktualisierung dieser Szenarien, die der Öffentlichkeit Ende 2018 zur Verfügung stehen werden.

Erste Resultate wurden im Bericht Akademien der Wissenschaft Schweiz vorgestellt.[58] Stellvertretend seien hier die Anzahl der Sommer- und Frosttage erwähnt, die besonders für die Landwirtschaft und den Tourismus von Bedeutung sind (Abb. 9).[59] Im Schweizer Mittelland werden die grössten Veränderungen dort auftreten, wo die Mehrheit der Bevölkerung lebt und die Landwirtschaft stattfindet. Auch in der Schweiz bestehen deutliche Vorteile unter einem Klimaschutz-Szenario gegenüber einem Klimawandel-Szenario: Wenn der Klimawandel beschränkt werden kann, sind weniger kostspielige Anpassungsmassnahmen notwendig.

Besondere Verletzlichkeit besteht für die Schweiz im Bereich der Schnee- und Gletscherbedeckung (Abb. 10). Nach neusten Studien wird die Schneedecke dünner, und unterhalb von 1200 m.ü.M. wird sie gegen Ende des 21. Jahrhunderts fast



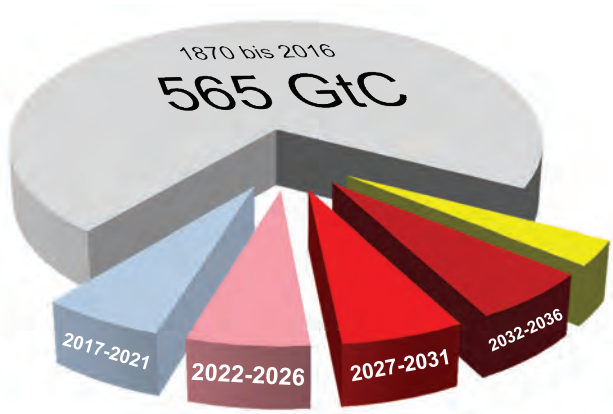
10 Entwicklung des Grossen Aletschgletschers während des 21. Jahrhunderts. Gegen Ende des Jahrhunderts werden Gletscher nur noch über einer Höhe von 3000 m über Meer existieren können.[53]

vollständig verschwinden.[60] Der Rückgang der Gletscher ist bereits eingeleitet und wird bis Ende des 21. Jahrhunderts dramatische Ausmasse annehmen. Die Abschätzungen für ein Klimaszenario mit einer Erwärmung in der Schweiz von ca. 4,5°C gegen Ende des 21. Jahrhunderts ergeben einen Rückgang von 60 bis 80% der Gletscherfläche.[61] Selbst im niedrigsten Szenario dieser Studie, mit einer Erwärmung von 3,7°C gegenüber 1961 bis 1990, verlieren die Gletscher eine Fläche von knapp 50%. Dies wird zu einem völlig neuen «Gesicht» der Schweizer Berglandschaft führen. Dieses wird nicht mehr von einer imposanten Gletscherwelt geprägt sein, sondern zunehmend von einer sich schnell entwickelnden Landschaft mit Landformen, wie wir sie bereits heute in Gletschervorfeldern beobachten können.

Die Hausaufgaben nach der Pariser Vereinbarung von 2015

Am 12. Dezember 2015 wurde die historische Pariser Vereinbarung der UNO-Rahmenkonvention über Klimaänderungen im Konsens verabschiedet. Nach jahrelangen Verhandlungen einigte man sich in Artikel 2 der Vereinbarung darauf, dass *als globale Antwort auf die Bedrohung des Klimawandels der Anstieg der global gemittelten Temperatur deutlich unter 2°C über dem vor-industriellen Niveau gehalten werden soll und dass Anstrengungen unternommen werden sollen, den Temperaturanstieg auf 1,5°C zu beschränken.*[62] Die IPCC-Berichte liefern klare Handlungsvorgaben, die in Artikel 4 ausgeführt werden: *Um das in Artikel 2 gesteckte langfristige Ziel zu erfüllen, werden die Länder das globale Maximum der Treibhausgasemissionen so schnell wie möglich erreichen, anerkennend, dass dies für Entwicklungsländer länger dauern wird, und werden danach schnelle Absenkungen vornehmen, im Einklang mit der besten Wissenschaft, um ein Gleichgewicht zwischen menschverursachten Emissionen durch Quellen und Beseitigung durch Senken von Treibhausgasen in der zweiten Hälfte dieses Jahrhunderts zu erreichen, auf der Grundlage von Gleichheit und im Zusammenhang mit der nachhaltigen Entwicklung zur Ausmerzung der Armut.*

Es ist klar, dass zusätzliche Senken für Treibhausgase, wie sie in Artikel 4 implizit angesprochen werden, heute nicht zur Verfügung stehen. Die Hoffnung auf eine Technologie, die langfristig und im globalen Massstab CO_2 aus der Atmosphäre entfernen wird, wird sich wohl nicht erfüllen. Trotzdem werden sogenannte negative CO_2-Emissionen, also das Absaugen von CO_2 aus der Atmosphäre, in den meisten Klimaschutz-Szenarien vorausgesetzt, um die globale Erwärmung auf unter 1,5°C, bzw. 2°C zu halten.[63]



11 Das globale Kohlenstoff-Budget für das 2-Grad-Klimaziel beträgt 790 GtC, wovon bereits 565 GtC bis Ende 2016 verbraucht wurden. Falls die heutige weltweite CO_2-Emission von 10 GtC pro Jahr konstant bleibt, werden bis 2036 noch 200 GtC emittiert, so dass danach nur noch 25 GtC übrig bleiben werden (gelb) – also dannzumal weniger als 3 Jahre bis zum vollständigen Verbrauch des CO_2-Budgets für das 2-Grad-Ziel.

United Nations
FCCC/CP/2015/L.9/Rev.1
Framework Convention on Climate Change
Distr.: Limited
12 December 2015
Original: English

Conference of the Parties
Twenty-first session
Paris, 30 November to 11 December 2015

Agenda item 4(b)
Durban Platform for Enhanced Action (decision 1/CP.17)
Adoption of a protocol, another legal instrument, or an agreed outcome with legal force under the Convention applicable to all Parties

ADOPTION OF THE PARIS AGREEMENT

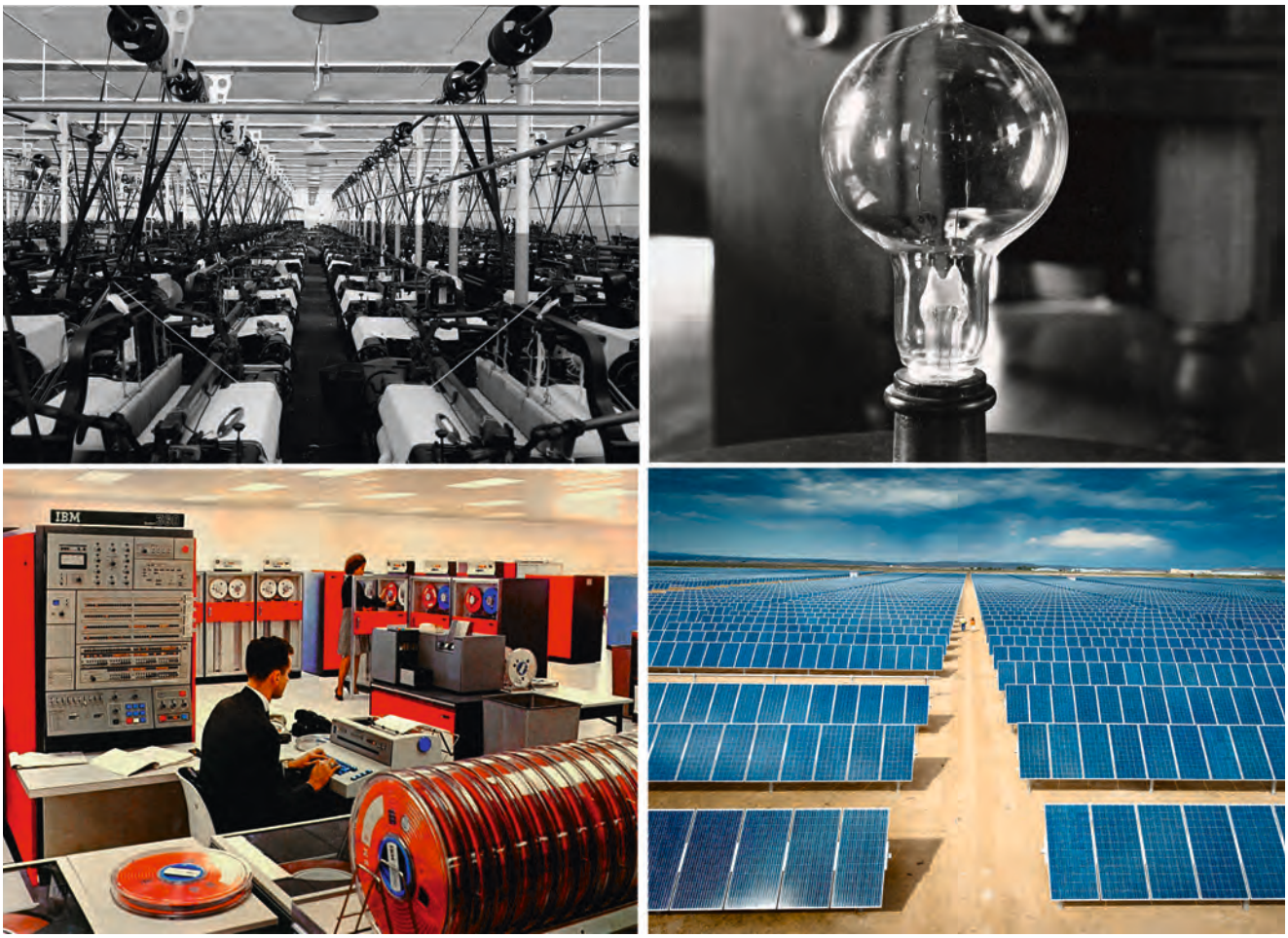
Proposal by the President

12 Zwei Schlüsseldokumente für die Zukunft unseres Planeten: 17 Ziele der Nachhaltigen Entwicklung, die von den Vereinten Nationen am 25.9.2015 verabschiedet wurden (links), und die Pariser Vereinbarung der UNO-Rahmenkonvention über Klimaänderungen (rechts), die am 12.12.2015 verabschiedet wurde und bereits am 4.11. 2016 in Kraft trat.

Der direkte Zusammenhang zwischen der Erwärmung und den kumulativen Emissionen von Treibhausgasen bedeutet, dass zur Stabilisierung der Temperatur die Summe aller Emissionen ab ca. 2050 null sein muss. Das ist die Konsequenz des globalen CO_2-Budgets des Summary for Policymakers der IPCC Arbeitsgruppe I.[42] Nach der Schätzung von IPCC beträgt das mit dem 2°C-Ziel verträgliche CO_2-Budget 790 GtC, wovon bis Ende 2016 bereits 565 GtC emittiert wurden, das heisst, es bleiben noch knapp 30% des CO_2-Budgets übrig (Abb. 11).[64] Nach den heutigen Emissionen von 10 GtC würde das Budget noch etwa 22 Jahre reichen, bevor es vollständig aufgebraucht ist. Danach wird das 2-Grad-Ziel verloren sein.[65] Unter heutigen Emissionen wird in nur zehn Jahren das 2-Grad-Ziel ebenso ehrgeizig sein wie das 1,5-Grad-Ziel heute.[66]

Im Jahr 2015 wurden zwei grundlegende, eng miteinander verknüpfte Ziele festgelegt (Abb. 12). Neben der historischen Pariser Vereinbarung gaben sich die Vereinten Nationen die Sustainable Development Goals, die bis 2030 erreicht werden sollen. Diese bestehen aus 17 konkreten Zielen. Zuallerobersst steht die Ausmerzung der Armut und des Hungers. Gesundheit und Ausbildung werden als nächste genannt; Anstrengungen gegen den Klimawandel ist Ziel Nummer 13. Es ist offensichtlich, dass viele der Nachhaltigkeitsziele einen direkten Einfluss auf den Klimaschutz haben. Ohne Entwicklung der ärmsten Länder, die am meisten vom Klimawandel betroffen sind, kann globaler Klimaschutz nicht zum Erfolg führen. Deshalb sind saubere Energiequellen (Ziel 7) sowie gute Arbeitsbedingungen und industrielle Innovation und Infrastruktur (Ziel 9) ebenso unabdingbar wie verantwortungsvoller Konsum und Produktion (Ziel 12) und Friede, Gerechtigkeit und starke Institutionen (Ziel 16). Andererseits sind ohne Klimaschutz viele der Nachhaltigkeitsziele, wie zum Beispiel sauberes Wasser (Ziel 6) oder Leben unter Wasser und auf dem Land (Ziele 14 und 15), ernsthaft gefährdet. Erfolgreiche Massnahmen kombinieren gleichzeitig die Klimaschutzziele mit der nachhaltigen Entwicklung, die im legendären Brundtland Report so definiert wird, dass sie *die Fähigkeit künftiger Generationen, ihre Bedürfnisse zu decken, nicht gefährdet.*[67] Diese Generationengerechtigkeit ist durch den Klimawandel und seine Auswirkungen direkt bedroht. Der Brundtland Report hält bereits 1987 fest, dass der menschenverursachte Klimawandel ein *beunruhigendes Risiko* sei.

Diese globalen Ziele müssen durch lokales, regionales und persönliches Handeln erreicht werden. Jedes Land ist aufgefordert, seinen Beitrag zu leisten,



13 Ansichten der industriellen Revolutionen der Menschheit. Die drei industriellen Revolutionen Mechanisierung, Elektrifizierung und Digitalisierung fanden in den letzten 250 Jahren statt. Die vierte industrielle Revolution, die Dekarbonisierung, hat bereits begonnen. Sie ist unumgänglich für das Erreichen des in Paris vereinbarten Klimaziels.

allen voran die industrialisierten und hochentwickelten Länder. Letztere haben den höchsten Anteil an kumulativen CO_2-Emissionen und stehen deshalb in der historischen Verantwortung, die technologische Transformation zu einer CO_2-freien Welt voranzutreiben. Die Aufgabe ist immens. Die Reduktion von fossilen CO_2-Emissionen gleicht einer industriellen Revolution, die neue Produkte und neue Infrastruktur hervorbringen muss. Die Nachhaltigkeitsziele andererseits erfordern einen völlig neuen Umgang mit den Ressourcen. Dies sind die integralen Elemente dieser industriellen Revolution.

Der Mensch hat mehrere industrielle Revolutionen durchlebt (Abb. 13). Die erste industrielle Revolution war die **Mechanisierung**, die den Begriff der menschlichen Arbeit neu definierte. Muskelarbeit wurde durch Maschinenarbeit ersetzt. Dies war der Anfang der Massenproduktion von Gütern; mit all ihren positiven und negativen Konsequenzen. Die zweite industrielle Revolution war die **Elektrifizierung**, die eine hochwertige und einfach transportierbare Energieform bereitstellte. Grundlegend neue industrielle Prozesse wurden erfunden: Beleuchtung, Telegrafie und Telefonie haben die Arbeitswelt völlig neu gestaltet. Die **Digitalisierung**

kann als dritte industrielle Revolution bezeichnet werden. Erstmals konnten durch Computer Berechnungen durchgeführt werden, die vorher unmöglich waren oder zu viel Zeit beanspruchten. Die Speicherung von Daten und die Verarbeitung von Informationen wurden durch die Digitalisierung auf eine neue Basis gestellt. Diese industrielle Revolution hat Produkte wie Mobiltelefon und Laptop erschaffen, die inzwischen praktisch von der ganzen Menschheit genutzt werden.

Jede der drei bisherigen industriellen Revolutionen hat das menschliche Leben unumkehrbar verändert. Heute würden nur die wenigsten auf die Errungenschaften der Mechanisierung, der Elektrifizierung und der Digitalisierung verzichten. Das Verwenden dieser Techniken erfordert jedoch Energie, die bis anhin hauptsächlich durch fossile Energieträger wie Kohle, Erdöl und Erdgas zur Verfügung stand. Im Wesentlichen hat hier seit der erstmaligen industriellen Nutzung der Kohle zu Beginn des 19. Jahrhunderts technologisch keine Revolution stattgefunden. Zwar wurde der Verbrennungsmotor äusserst erfolgreich verbessert, doch am Prinzip der thermodynamischen Energiegewinnung und am Problem der Entsorgung des durch die Verwendung fossiler Brennstoffe entstehenden Abfalls, CO_2, hat sich nichts verändert.

Klimaschutz bedeutet Reduktion von CO_2-Emissionen. Das heisst, dass die Verwendung von fossilen Energieträgern so schnell wie möglich eliminiert wird. Alte Technologie muss ersetzt werden, neue Produkte müssen erfunden werden, die Infrastruktur, die sich nach 1950 auf die fossilen Energieträger ausgerichtet hat, muss neu aufgebaut werden. Die Aufgabe ist nichts weniger als die vierte industrielle Revolution, die **Dekarbonisierung**. Im Unterschied zu den vorangegangenen ist für diese industrielle Revolution der Weg bereits vorgezeichnet. Das Endziel ist die Ablösung fossiler Energieträger und aller Technologien, die davon abhängig sind. Der Begriff industrielle Revolution weist auf die Grösse der Aufgabe hin: Sie erfordert weltweite Anstrengungen, wird gigantische Investitionen benötigen und wird über Jahrzehnte andauern. Sie wird in gleicher Weise sämtliche Aspekte der menschlichen Tätigkeit erfassen, wie dies auch die drei vorangehenden industriellen Revolutionen taten.

Herausforderungen und Ausblick

Der Begriff industrielle Revolution steht aber auch für Aufbruch und Hoffnung. Denn die drei bereits erfolgten industriellen Revolutionen haben neue Arbeitsplätze geschaffen, die generell anspruchsvoller waren und eine Reform der Ausbildung von Generationen von Menschen einleiteten. Sie erzeugten Freiraum für neue Aktivitäten und legten Kapazitäten frei, die den Umbruch beschleunigten. Eindrückliche Beispiele sind die Motorisierung, die nach der Mechanisierung und Elektrifizierung zu Beginn des 20. Jahrhunderts blitzschnell erfolgte (Abb. 14), oder die Entwicklung der Rechenleistung von Mikroprozessoren, die im Zuge der Digitalisierung entwickelt wurden. Ihre Rechenleistung wächst exponentiell mit der Zeit: Nach Moore's Law verdoppelt sie sich ca. alle zwei Jahre.[68]

Jede industrielle Revolution hat neue Werte geschaffen. Die Mechanisierung hat den Wert der menschlichen Arbeit, die Elektrifizierung denjenigen der Kommunikation und die Digitalisierung denjenigen der Information neu definiert. Und so besteht kein Zweifel, dass die vierte industrielle Revolution, die Dekarbonisierung,

14 Die Umstellung der Verkehrsinfrastruktur erfolgte trotz anfänglicher Zweifel und Skepsis blitzschnell. Strassenansicht in Manhattan von 1900 und 13 Jahre später.

ebenfalls mehr Arbeitsplätze schafft, Ressourcen sicherstellt durch Einschränkung des Klimawandels und völlig neue Werte schafft, indem die Nachhaltigkeit zum globalen Standard wird.

Industrielle Revolutionen sind Zeiten beschleunigter Entwicklung, in welchen die gesellschaftlichen und gesetzlichen Strukturen herausgefordert und oft gesprengt werden. Die Mechanisierung hat die Fliessbandarbeit erst ermöglicht und gezeigt, dass neue Gesetze betreffend Arbeitszeit und Sicherheit am Arbeitsplatz notwendig werden. Diese Rechte mussten oft auf der Strasse und gewaltsam eingefordert werden, das heisst, industrielle Revolutionen erfordern neue gesetzliche Grundlagen und verändern Beziehungen zwischen den gesellschaftlichen Akteuren. «Learning by doing» charakterisiert zutreffend, wie die Menschen mit den Folgen der bisherigen industriellen Revolutionen umgegangen sind. Das grosse Potenzial der Elektrifizierung konnte sich nur dank einheitlicher Standards entfalten. Neue Regelungen müssen aufgestellt werden, sogar internationale Organisationen sind aufgrund der Elektrifizierung und der dadurch ermöglichten internationalen Kommunikation geschaffen worden. Im Jahr 1865 wurde in Bern der Internationale Telegraphenverein gegründet, die nach dem Roten Kreuz älteste internationale Organisation.

Heute befinden wir uns mitten in der Digitalisierung, der dritten industriellen Revolution. Auch diese Revolution stellt die Gesellschaft vor völlig neue Herausforderungen und Gefahren. Datenschutz und Überwachung können nur im Rahmen neuer Regelwerke erfolgen. Der Benutzer muss neue Instrumente lernen und diese mit einem neuen Bewusstsein einsetzen. Sicherheit und Langlebigkeit elektronischer Information ist keine Selbstverständlichkeit. Die bei Weitem grösste Herausforderung der Digitalisierung ist jedoch die Verdrängung des Menschen am Arbeitsplatz. Roboter übernehmen zunehmend komplexere Aufgaben, selbst in Bereichen, in denen bisher ausschliesslich hochspezialisierte Arbeitskräfte zum Einsatz kamen. Kurz: Arbeit wird durch Tätigkeit ersetzt.

Diese industrielle Revolution stellt fundamentale Fragen, deren Antworten wir noch nicht kennen. Wie wird der Arbeitsplatz in einer digitalisierten Welt aussehen? Kann der Mensch genügend schnell und umfassend eingreifen, wenn Roboter auf unvorhergesehene Entwicklungen falsch oder gefährlich reagieren? Wer haftet für Schäden, die ein Roboter oder ein fahrerloses Automobil anrichtet? Wie können soziale Ausgaben der Gesellschaft finanziert werden, wenn die Arbeitsleistung nicht mehr steuerbar entschädigt wird? Antworten werden wir nur finden, wenn unser Handeln vorausschauend und verantwortungsvoll ist. Entscheidungen müssen auf wissenschaftlichen Fakten und ethischen Prinzipien gründen. Hier wartet die eigentliche Herausforderung für Gesellschaft und Gesetzgeber, um die Digitalisierung zum Erfolg zu bringen.

Die Herausforderungen der Dekarbonisierung sind ebenfalls immens. Während bei der Digitalisierung Arbeit und Tätigkeit neu definiert werden müssen, erfordert die Dekarbonisierung den vollständigen Ersatz einer bewährten und scheinbar günstigen Technologie mit weltweiter Durchdringung. Diese Transformation muss so erfolgen, dass sie machbar ist für alle – auch für die Menschen aus den Entwicklungsländern. Aus dem Prinzip der *common but differentiated responsibility*, das ein Grundpfeiler der UNO-Rahmenkonvention über Klimaänderungen ist, ergibt sich die Aufforderung an Industrienationen, in der Dekarbonisierung

voranzuschreiten und die Anwendung CO_2-armer und CO_2-freier Technologie aggressiv voranzutreiben. Die Beschleunigung wird von einem Technologieschub ausgehen, ähnlich demjenigen, den wir bei der Digitalisierung erleben.[69]

Es gibt allerdings einen fundamentalen Unterschied zur Digitalisierung. Während in jener industriellen Revolution Technologien entwickelt wurden, die völlig neuartige Aufgaben erledigen konnten, muss in der Dekarbonisierung eine etablierte und weltweit eingesetzte Technologie ersetzt werden. Diese Transformation geht nicht von alleine, es braucht eine eigentliche «Aktivierungsenergie», um den Prozess anzustossen und Widerstände zu überwinden. Sorgfältig ausgestaltete Lenkungsabgaben, zusammen mit einem Preis für die Emission von CO_2, sind Instrumente, die neben der technologischen Innovation eingesetzt werden müssen, um konsequent über die kommenden Jahrzehnte zu dekarbonisieren. Eine globale Reduktion der CO_2-Emissionen von mindestens 5% pro Jahr ist notwendig, um das 2-Grad-Ziel nicht zu verfehlen. Das kann nur mit einem Bündel von Massnahmen erreicht werden.

Es ist offensichtlich, dass die Dekarbonisierung das heutige Geschäftsmodell der Erdöl- und Kohleindustrie obsolet machen wird. Grosse finanzielle und geostrategische Interessen werden letztendlich durch die Umsetzung der Pariser Vereinbarung tangiert. Deshalb ist es nicht verwunderlich, dass in der Klimadebatte in letzter Zeit vermehrt zwei Argumente vorgebracht werden.

Erstens wird behauptet, dass es in der Bekämpfung des Klimawandels zielführender sein könnte, die Symptome zu lindern und sich an den Wandel anzupassen, als die Ursache zu bekämpfen und die Emissionen von Treibhausgasen zu reduzieren. Verschiedene Ideen zur künstlichen Abkühlung des globalen Klimas werden unter dem Begriff *Geoengineering* gegenwärtig diskutiert.[70] Grundsätzlich gibt es zwei Massnahmen: Reduktion der solaren Einstrahlung (Solar Radiation Management, SRM) oder aktive Entfernung von CO_2 aus der Atmosphäre (Carbon Dioxide Removal, CDR). Als SRM-Technologien werden das Positionieren von gigantischen Spiegeln im Weltraum, das Ausbringen von Schwebeteilchen (Sulphat-Aersole) in der unteren Stratosphäre oder die verstärkte Wolkenbildung genannt. Neben der Frage, ob dies überhaupt technisch umsetzbar ist, ergeben sich mit SRM zwei Probleme, die diesen Ansatz zum Hochrisikounternehmen werden lassen. Wenn SRM implementiert würde – was für die Ausbringung von Sulphat in die untere Stratosphäre unter hohen Kosten vielleicht möglich wäre –, gäbe es keinen unmittelbaren Grund mehr, weitere Investitionen zur Reduktionen der CO_2-Emissionen zu tätigen. Damit entstünde ein zunehmendes Ungleichgewicht zwischen der atmosphärischen CO_2-Konzentration – die weiterhin ungebremst zunimmt – und der global gemittelten Temperatur – die künstlich konstant gehalten wird. Würde dann zu einem Zeitpunkt in der Zukunft aus irgendeinem Grund – zum Beispiel inakzeptable Nebenwirkungen oder Schwierigkeiten der Gouvernanz – die Ausbringung von Sulphat eingestellt, würde die globale Temperatur entsprechend der inzwischen stark erhöhten CO_2-Konzentration ansteigen müssen, bis wieder ein neues Gleichgewicht erreicht wäre. Dieser Anstieg würde, je nach Dauer des vorgängigen SRM, extrem schnell ablaufen: Berechnungen zeigen, dass dies etwa zehn Mal schneller als die gegenwärtige Erwärmung erfolgen könnte. Der nachfolgende rapide Klimawandel würde die Grenzen der Anpassungsfähigkeit für viele Ökosysteme sprengen. Dies wird als «Termination Problem» bezeichnet, ein

bekanntes Risiko, vor dem wir die politischen Entscheidungsträger auch im Summary for Policymakers des IPCC Berichts gewarnt haben.[42]

Daneben hat SRM einen weiteren Nachteil: Das Problem der Versauerung des Ozeans bleibt ungelöst. Steigende CO_2-Konzentrationen in der Atmosphäre führen zu einem erhöhten CO_2-Gehalt im Ozean. Dies säuert das Wasser an und schadet den Organismen, die Kalkschalen bilden und den Beginn der Nahrungskette für Fische bilden. Schliesslich hat SRM auch unerwünschte Nebenwirkungen: So verursacht die Abkühlung auch eine Veränderung des Wasserkreislaufs weltweit. Diese Veränderung ist jedoch nicht einfach eine Rückkehr zu Bedingungen, wie sie bei niedrigeren CO_2-Konzentrationen vorlagen, sondern führt zu neuen Verteilungen des Niederschlags. Veränderungen in der Ressource Wasser bergen ein grosses Konfliktpotenzial, wie das im Zusammenhang mit dem Krieg in Syrien bereits vermutet wird.[71]

CDR, als zweite technologische Massnahme, den Klimawandel zu bekämpfen, hat kein «Termination Problem» und verringert zudem die Ozeanversauerung. Trotzdem birgt CDR das Risiko der Langzeitsicherheit: wenn CO_2 zum Beispiel in den Untergrund gebracht wird oder durch BECCS (Bio Energy with Carbon Capture and Storage) im Boden gespeichert wird. So stellt sich die Frage, ob das CO_2 langfristig von der Atmosphäre ferngehalten werden kann oder ob durch veränderte Umweltbedingungen doch wieder grössere Mengen CO_2 in die Atmosphäre gelangen. BECCS beeinflusst die künftige Landnutzung: Soll Land für Nahrung oder Treibstoffherstellung genutzt werden? Mit diesem Dilemma sind vor allem ärmere Länder konfrontiert, da die biologische Produktion von Treibstoffen ökonomisch äusserst attraktiv sein könnte.

Das zweite Argument, mit dem die Dekarbonisierung zu verhindern versucht wird, sind die Kosten. Diese seien untragbar und würden das Funktionieren der wichtigsten Wirtschaftssysteme in den Ruin stürzen. Selbstverständlich ist der Ersatz weltweiter Infrastrukturen, der Umbau der Energieproduktion und Verteilsysteme, das Anpassen von Verkehrsnetzen und die Veränderungen des persönlichen Umgangs mit Energie, mit hohen Kosten und Barrieren verbunden. Hier wird oft die Energiewende in Deutschland genannt, wo Kosten bis zu 1100 Milliarden Euro anfallen sollen.[72] Wenn allerdings der Zeitraum zur Umsetzung der Energiewende bis 2050 und die wirtschaftliche Leistung von Deutschland berücksichtigt wird, so entstehen pro Kopf sehr geringe Kosten, die der Arbeitsleistung in Deutschland von gerade nur zwei Kaffeepausen pro Woche entsprechen. Diese Kostenabschätzung deckt sich mit derjenigen des IPCC.[73]

Solche Kostenabschätzungen ignorieren die nicht auszublendenden, sekundären Nutzen, die durch die Vermeidung von Klimaschäden, die Aufrechterhaltung von Ökosystemdienstleistungen und die deutlich geringeren Aufwendungen für Anpassung realisiert werden. Diese würden alle positiv zu Buche schlagen. Aus diesen Überlegungen ist die Dekarbonisierung nicht nur machbar, sondern sie garantiert Wachstum und leitet eine Entwicklung in die richtige Richtung ein, nämlich das Erreichen der UNO-Nachhaltigkeitsziele. Das ist wohl die wichtigste Aufgabe der Menschheit im 21. Jahrhundert, um die Lebensgrundlagen der künftigen Generationen nicht einzuschränken oder sogar zu vernichten. Denn wir sind *die erste Generation, die die Auswirkungen des Klimawandels spürt, und die letzte Generation, die etwas dagegen unternehmen kann.*[74]

Der Klimawandel

1 IPCC, *Climate Change 2014: Synthesis Report,* [R.K. Pachauri, et al. (eds.)], 148 pp., Cambridge University Press, 2014.

2 Lisiecki, L.E., M.E. Raymo, A Pliocene-Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic $d^{18}O$ records, *Paleoceanography, 20,* PA1003, doi: 10.1029/2004PA001071, 2005.

3 Die Schweiz während des letzteiszeitlichen Maximums (LGM), Bundesamt für Landestopographie, Wabern (Schweiz), 2009

4 Burga, C.A., G. Furrer, Zur Erforschung des Quartärs in der Schweiz, *Geographica Helvetica, 2,* 68–74, 1982.

5 Bard, E., Greenhouse effect and ice ages: historical perspective, *Comptes Rendus Geosciences, 336,* 603–638, 2004.

6 Brönnimann, S., D. Krämer, Tambora und das «Jahr ohne Sommer» 1816, *Geographica Bernensia,* 48 pp., 2016.

7 Agassiz, L., *Études sur les glaciers,* 346 pp., Jent & Gassmann, Neuchâtel, 1840.

8 Eicher, U., U. Siegenthaler, Palynological and oxygen isotope variations on late-glacial sediment cores from Switzerland, *Boreas, 5,* 109–117, 1976.

9 Schwander, J., U. Eicher, B. Ammann, Oxygen isotopes of lake marl at Gerzensee and Leysin (Switzerland), covering the Younger Dryas and two minor oscillations, and their correlation to the GRIP ice core, *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 159,* 203–214, 2000.

10 Adhémar, J., *Révolutions de la mer, déluges périodiques,* 184 pp., Carilian-Goeury et V. Dalmont, Paris, 1842.

11 Croll, J., On the physical cause of the change of climate during geological epochs, *Philosophical Magazine,* 121–134, 1864.

12 Milankovitch, M., *Kanon der Erdbestrahlung und seine Anwendung auf das Eiszeitenproblem,* 633 pp., Königlich Serbische Akademie, 1941.

13 Elderfield, H., P. Ferretti, M. Greaves, S. Crowhurst, I.N. McCave, D. Hodell, A.M. Piotrowski, Evolution of ocean temperature and ice volume through the Mid-Pleistocene climate transition, *Science, 337,* 704–709, 2012.

14 Jouzel, J., V. Masson-Delmotte, O. Cattani, G. Dreyfus, S. Falourd, G. Hoffmann, B. Minster, J. Nouet, J.-M. Barnola, J. Chappellaz, H. Fischer, J.C. Gallet, S. Johnsen, M. Leuenberger, L. Loulergue, D. Lüthi, H. Oerter, F. Parrenin, G. Raisbeck, D. Raynaud, J. Schwander, R. Spahni, R. Souchez, E. Selmo, A. Schilt, J.P. Steffensen, B. Stenni, B. Stauffer, T.F. Stocker, J.-L. Tison, M. Werner, E.W. Wolff, Orbital and millennial Antarctic climate variability over the last 800,000 years, *Science, 317,* 793–796, 2007.

15 Siegenthaler, U., H. Oeschger, Predicting future atmospheric carbon dioxide levels, *Science, 199,* 388–395, 1978.

16 UNFCCC, United Nations Framework Convention on Climate Change (FCCC/INFORMAL/84 GE.05-62220 (E) 200705), 1992.

17 Fourier, J., J. Fourier, Remarques générales sur les températures du globe terrestre et des espaces planétaires, *Annales de Chimie et de Physique, 27,* 136–167, 1824.

18 Tyndall, J., On the absorption and radiation of heat by gases and vapour, and on the physical connection of radiation, absorption and conduction, *Philosophical Magazine, 22,* 167–194, 273–285, 1861.

19 Ebelmen, J.-J., Sur les produits de la décomposition des espèces minérales de la famille des silicates, *Annales de Mines, 7,* 3–66, 1845.

20 Berner, R.A., K.A. Maasch, Chemical weathering and controls on atmospheric O_2 and CO_2: fundamental principles were enunciated by J.J. Ebelmen in 1845, *Geochimica Cosmochimica Acta, 60,* 1633–1637, 1996.

21 Arrhenius, S., On the influence of carbonic acid in the air upon the temperature of the ground, *Philosophical Magazine, 41,* 237–276, 1896.

22 Neftel, A., H. Oeschger, J. Schwander, B. Stauffer, R. Zumbrunn, Ice core sample measurements give atmospheric CO_2 content during the past 40,000 yr, *Nature, 295,* 220–223, 1982.

23 Callendar, G.S., The artificial production of carbon dioxide and its influence on temperature, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 64,* 223–240, 1938.

24 Hawkins, E., P.D. Jones, On increasing global temperatures: 75 years after Callendar, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 139,* 1961–1963, 2013.

25 Stauffer, B., G. Fischer, A. Neftel, H. Oeschger, Increase of atmospheric methane recorded in Antarctic ice core, *Science, 229,* 1386–1388, 1985.

26 Neftel, A., E. Moor, H. Oeschger, B. Stauffer, Evidence from polar ice cores for the increase in atmospheric CO_2 in the past two centuries, *Nature, 315,* 45–47, 1985.

27 Lüthi, D., M. Le Floch, B. Bereiter, T. Blunier, J.-M. Barnola, U. Siegenthaler, D. Raynaud, J. Jouzel, H. Fischer, K. Kawamura, T.F. Stocker, High-resolution carbon dioxide concentration record 650,000–800,000 years before present, *Nature, 453,* 379–382, 2008.

28 Loulergue, L., A. Schilt, R. Spahni, V. Masson-Delmotte, T. Blunier, B. Lemieux, J.-M. Barnola, D. Raynaud, T.F. Stocker, J. Chappellaz, Orbital and millennial-scale features of atmospheric CH_4 over the past 800,000 years, *Nature, 453,* 383–386, 2008.

29 Crutzen, P.J., E.F. Stoermer, The «Anthropocene», *IGBP Newsletter, 41,* 17–18, 2000.

30 MacFarling Meure, C., D. Etheridge, C.M. Trudinger, P. Steele, R. Langenfelds, T. Van Ommen, A. Smith, J. Elkins, Law Dome CO_2, CH_4 and N_2O ice core records extended to 2000 years BP, *Geophysical Research Letters, 33,* doi:10.1029/2006GL026152, 2006.

31 Dansgaard, W., Stable isotopes in precipitation, *Tellus, 16,* 436–468, 1964.

32 Oeschger, H., J. Beer, U. Siegenthaler, B. Stauffer, W. Dansgaard, C.C. Langway, Late glacial climate history from ice cores, in *Climate Processes and Climate Sensitivity,* edited by J.E. Hansen, T. Takahashi, pp. 299–306, American Geophysical Union, Washington, 1984.

33 Stocker, T.F., D.G. Wright, Rapid transitions of the ocean›s deep circulation induced by changes in surface water fluxes, *Nature, 351,* 729–732, 1991.

34 Capron, E., A. Landais, J. Chappellaz, A. Schilt, D. Burion, D. Dahl-Jensen, S.J. Johnsen, J. Jouzel, B. Lemieux-Dudon, L. Loulergue, M. Leuenberger, V. Masson-Delmotte, H. Meyer, H. Oerter, B. Stenni, Millennial and sub-millennial

scale climatic variations recorded in polar ice cores over the last glacial period, *Climate of the Past, 6*, 345–365, 2010.
35 Broecker, W.S., The biggest chill, *Natural History, 96,* 74–82, 1987.
36 Stocker, T.F., The seesaw effect, *Science, 282,* 61–62, 1998.
37 EPICA Community Members, One-to-one coupling of glacial climate variability in Greenland and Antarctica, *Nature, 444,* 195–198, 2006.
38 Stocker, T.F., A. Schmittner, Influence of CO_2 emission rates on the stability of the thermohaline circulation, *Nature, 388,* 862–865, 1997.
39 Principles Governing IPCC Work, www.ipcc.ch/pdf/ipcc-principles/ipcc-principles.pdf, 2013.
40 Stocker, T.F., IPCC Working Group I: The Swiss contribution from 1988–2014, in *From Weather Observations to Atmospheric and Climate Sciences in Switzerland. Celebrating 100 Years of the Swiss Society for Meteorology,* edited by S. Willemse, M. Furger, pp. 413–438, 2016.
41 IPCC, *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change,* [T.F. Stocker, et al. (eds.)], 1535 pp., Cambridge University Press, Cambridge, 2013.
42 IPCC, Summary for Policymakers, in *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change,* edited by T.F. Stocker, et al., pp. 1–30, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2013.
43 Stocker, T.F., G.-K. Plattner, Making use of the IPCC's powerful communication tool, *Nature Climate Change, 6,* 637–638, 2016.
44 World Resources Institute, www.wri.org.
45 Emissions Database for Global Atmospheric Research, http://edgar.jrc.ec.europa.eu/.
46 GISTEMP Team, GISS Surface Temperature Analysis (GISTEMP). NASA Goddard Institute for Space Studies https://data.giss.nasa.gov/gistemp/. 2017.
47 Brönnimann, S., C. Appenzeller, M. Croci-Maspoli, J. Fuhrer, M. Grosjean, R. Hohmann, K. Ingold, R. Knutti, M.A. Liniger, C.C. Raible, R. Rothlisberger, C. Schar, S.C. Scherrer, K. Strassmann, P. Thalmann, Climate change in Switzerland: a review of physical, institutional, and political aspects, *Wiley Interdisciplinary Reviews-Climate Change, 5,* 461–481, 2014.
48 Begert, M., T. Schlegel, W. Kirchhofer, Homogenous temperature and precipitation series of Switzerland from 1864 to 200, *International Journal of Climatology, 25,* 65–80, 2005.
49 Scherrer, S.C., M. Begert, M. Croci-Maspoli, C. Appenzeller, Long series of Swiss seasonal precipitation: regionalization, trends and influence of large-scale flow, *International Journal of Climatology, 36,* 3673–3689, 2016.
50 Schmidli, J., C. Frei, Trends in heavy precipitation and wet and dry spells in Switzerland during the 20th century, *International Journal of Climatology, 25,* 753–771, 2005.
51 Scherrer, S.C., C. Appenzeller, M. Laternser, Trends in Swiss Alpine snow days: The role of local- and large-scale climate variability, *Geophysical Research Letters, 31,* L13215, 2004.
52 Serquet, G., C. Marty, J.-P. Dulex, M. Rebetez, Seasonal trends and temperature dependence of the snowfall/precipitation-day ratio in Switzerland, *Geophysical Research Letters, 38,* L07703, 2011.
53 CH2014-Impacts, Toward Quantitative Scenarios of Climate Change Impacts in Switzerland, Oeschger Centre for Climate Change Research, Swiss Federal Office of the Environment, MeteoSwiss, C2SM, Agroscope, and ProClim, Bern, Switzerland, 136 pp., 2014.
54 Fischer, M., M. Huss, C. Barboux, M. Hoelzle, The new Swiss Glacier Inventory SGI2010: relevance of using high-resolution source data in areas dominated by very small glaciers, *Arctic, Antarctic and Alpine Research, 46,* 933–945, 2014.
55 Scherrer, S.C., E.M. Fischer, R. Posselt, M.A. Liniger, M. Croci-Maspoli, R. Knutti, Emerging trends in heavy precipitation and hot temperature extremes in Switzerland, *Journal of Geophysical Research Atmospheres, 121,* 2626–2637, 2016.
56 PERMOS 2016, Permafrost in Switzerland 2010/2011 to 2013/2014, Cryospheric Comission of the Swiss Academy of Sciences, 85 pp., 2016.
57 CH2011, Swiss Climate Change Scenarios CH2011, C2SM, MeteoSwiss, ETH, NCCR Climate, and OcCC, 88 pp., 2011.
58 Akademien der Wissenschaft Schweiz, *Brennpunkt Klima Schweiz. Grundlagen, Folgen und Perspektiven,* 216 pp., Swiss Academies Reports 11, 2016.
59 Zubler, E.M., S.C. Scherrer, M. Croci-Maspoli, M.A. Liniger, C. Appenzeller, Key climate indices in Switzerland: expected changes in a future climate, *Climatic Change, 123,* 255–271, 2014.
60 Marty, C., S. Schlögl, M. Bavay, M. Lehning, How much can we save? Impact of different emission scenarios on future snow cover in the Alps, *The Cryosphere, 11,* 517–529, 2017.
61 Linsbauer, A., F. Paul, H. Machguth, W. Haeberli, Comparing different methods to model scenarios of future glacier change in the Swiss Alps, *Annals of Glaciology, 54,* 241–253, 2013.
62 UNFCCC, The Paris Agreement, FCCC/CP/2015/L.9/Rev.1, United Nations Framework Convention on Climate Change, 2015.
63 Rogelj, J., G. Luderer, R.C. Pietzcker, E. Kriegler, M. Schaeffer, V. Krey, K. Riahi, Energy system transformations for limiting end-of-century warming to below 1.5°C, *Nature Climate Change, 5,* 519–527, 2015.
64 Le Quéré, C., et al., Global Carbon Budget 2016, *Earth System Science Data, 8,* 605–649, 2016.
65 Stocker, T.F., The closing door of climate targets, *Science, 339,* 280–282, 2013.
66 Pfister, P.L., T.F. Stocker, Earth System commitments due to delayed mitigation, *Environmental Research Letters, 11,* 014010, 2016.
67 Brundtland, G.H., Report of the World Commission on Environment and Development: Our Common Future, 300 pp., 1987.
68 Moore, G.E., Cramming more components onto integrated circuits, *Electronics, 38,* April 19, 1965.
69 Obama, B., The irreversible momentum of clean energy, *Science, 355,* 126–129, 2017.

70 Geoengineering the Climate, The Royal Society, London, 84 pp., 2009.
71 Kelley, C.P., S. Mohtadi, M.A. Cane, R. Seager, Y. Kushnir, Climate change in the Fertile Crescent and implications of the recent Syrian drought, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 112,* 3241–3246, 2015.
72 Henning, H.-M., A. Palzer, Was kostet die Energiewende? Wege zur Transformation des Deutschen Energiesystems bis 2050, Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme ISE, Freiburg, 89 pp., 2015.
73 IPCC, *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change,* [O. Edenhofer, et al. (eds.)], 1435 pp., Cambridge University Press, Cambridge, 2014.
74 Obama, B., Remarks by the President at U.N. Climate Change Summit, 23. September 2014, 2014.