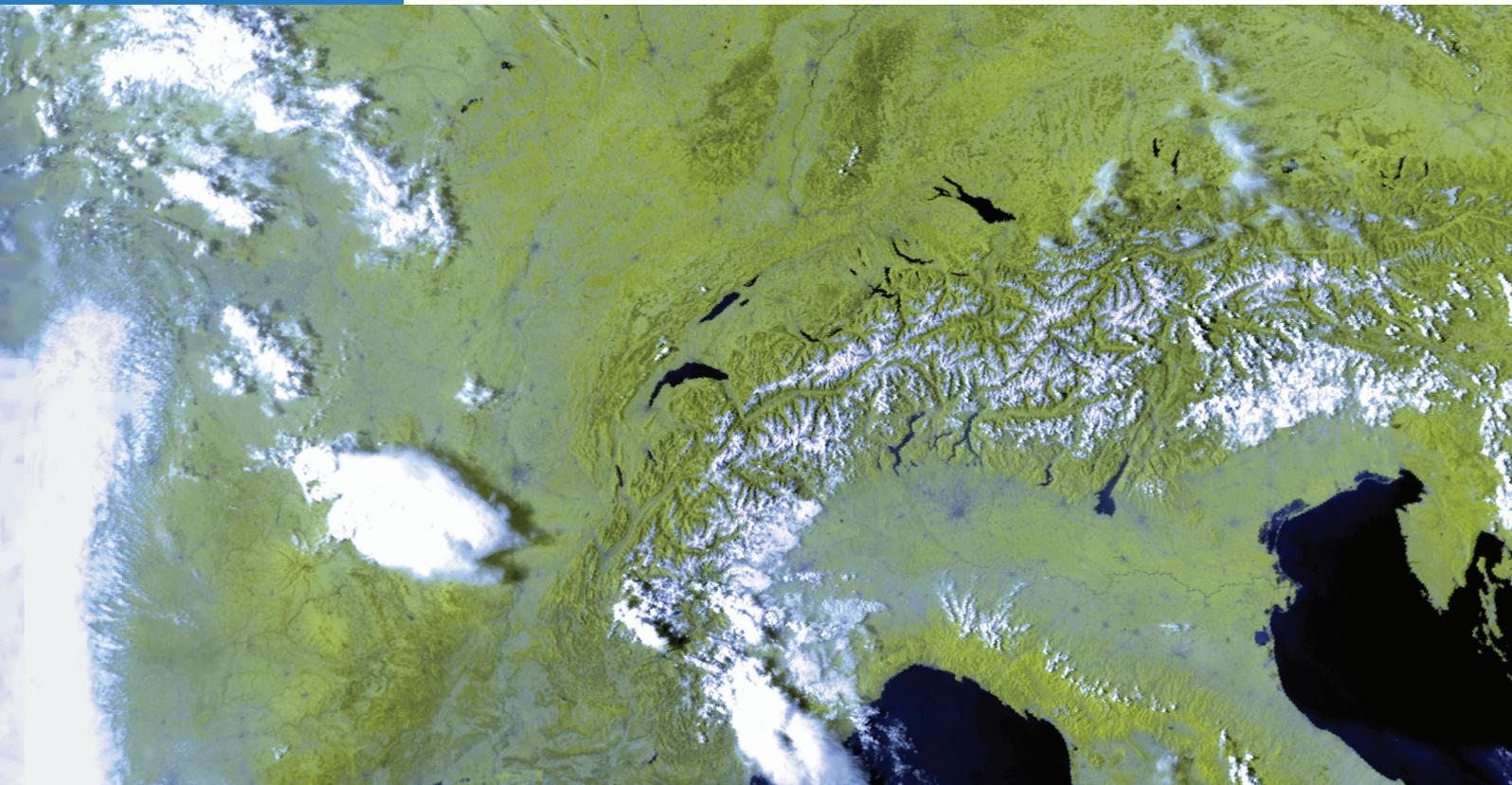


## **Das Klima ändert – auch in der Schweiz**

**Die wichtigsten Ergebnisse des  
dritten Wissensstandsberichts des IPCC  
aus der Sicht der Schweiz**



**OcCC**

Organe consultatif sur les changements climatiques  
Beratendes Organ für Fragen der Klimaänderung

## **Das Klima ändert – auch in der Schweiz**

**Die wichtigsten Ergebnisse des  
dritten Wissensstandsberichts des IPCC  
aus der Sicht der Schweiz**

---

# Impressum

---

## **Autoren des Berichts**

Christian Albrecht	Bundesamt für Raumentwicklung ARE, Bern
Peter Baccini	Stoffhaushalt und Entsorgungstechnik, ETH Zürich
Andrea Baranzini	Université de Genève, École Polytechnique Fédérale de Lausanne
Martin Beniston	Institut de Géographie, Université de Fribourg
Harald Bugmann	Departement Forstwissenschaften, ETH Zürich
Thomas Bürki	Thomas Bürki GmbH, Benglen
Samuel Fankhauser	European Bank for Reconstruction and Development, London
Andreas Fischlin	Institut für Terrestrische Ökologie, ETH Zürich
Jürg Fuhrer	Eidg. Forschungsanstalt für Agrarökologie und Landbau, Zürich
Yves Gonseth	Centre suisse de cartographie de la faune, Neuchâtel
Sabine Güsewell	Geobotanisches Institut, ETH Zürich
Roland Hohmann	ProClim-, Bern
Josef Janssen	Institut für Wirtschaft und Ökologie, Universität St. Gallen
Fortunat Joos	Klima- und Umweltphysik, Universität Bern
Wolfram Kägi	B.S.S. Economic Consultants, Basel
Daniel K. Keuerleber-Burk	MeteoSchweiz, Zürich
Nino Künzli	Institut für Sozial- und Präventivmedizin, Universität Basel
Lucy Oglesby	Institut für Sozial- und Präventivmedizin, Universität Basel
Pascal Previdoli	Bundesamt für Energie, Bern
Bruno Schädler	Bundesamt für Wasser und Geologie, Bern
Thomas Stocker	Klima- und Umweltphysik, Universität Bern

## **Begutachter**

Wilfried Haerberli	Geographisches Institut, Universität Zürich
Eberhard Jochem	Center for Energy Policy and Economics, ETH Zürich
Atsumu Ohmura	Institut für Atmosphären- und Klimawissenschaften, ETH Zürich
Christoph Schär	Institut für Atmosphären- und Klimawissenschaften, ETH Zürich
Heinz Wanner	Geographisches Institut, Universität Bern
Alexander Wokaun	Paul Scherrer Institut, Villigen

## **Autoren zusätzlicher Beiträge**

Wilfried Haerberli	Geographisches Institut, Universität Zürich
Hans Hurni	Geographisches Institut, Universität Bern
Eberhard Jochem	Center for Energy Policy and Economics, ETH Zürich
Nino Künzli	Institut für Sozial- und Präventivmedizin, Universität Basel
Hansruedi Müller	Forschungsinstitut für Freizeit und Tourismus, Universität Bern
Urs Neu	ProClim-, Bern
Alexander Wokaun	Paul Scherrer Institut, Villigen

## **Begleitgruppe OcCC**

Gabi Hildesheimer	Vereinigung für ökologisch bewusste Unternehmensführung, Zürich
Ruth Kaufmann-Hayoz	Interfakultäre Koordinationsstelle für Allgemeine Ökologie, Universität Bern
Hansruedi Müller	Forschungsinstitut für Freizeit und Tourismus, Universität Bern

## **Projektleitung und Redaktion**

Roland Hohmann	ProClim-, Bern
----------------	----------------

## **Redaktionelle Mitarbeit**

Bettina Büchler	ProClim-, Bern
Theres Grau	ProClim-, Bern
Sonja Trappe	ProClim-, Bern

## **Layout**

Roland Hohmann	ProClim-, Bern
Gabriele Müller-Ferch	ProClim-, Bern

## **Korrektorat**

Lektorama, Freyastrasse 26, 8036 Zürich

## **Übersetzung ins Französische**

Jean-Jacques Dätwyler, Sciencepress, Wabernstrasse 34, 3007 Bern

Der vorliegende Bericht wurde am 10. Januar 2002 vom OcCC gutgeheissen.

---

# Inhaltsverzeichnis

---

Editorial	4
Vorwort	5
Zusammenfassung	7
1. Beschreibung der globalen Klimaänderung	9
1.1. Beobachtete Klimaänderung	9
1.2. Veränderung der Strahlungsbilanz der Erde	13
1.3. Die Ursache der Klimaänderung der letzten 50 Jahre	14
1.4. Abschätzung künftiger Veränderungen bis 2100	15
1.5. Stabilisierungsszenarien und ihre Konsequenzen	19
2. Auswirkungen der Klimaänderung	21
2.1. Auswirkungen der Klimaänderung auf den Wasserkreislauf und die Wasserwirtschaft	21
2.2. Auswirkungen der Klimaänderung auf Ökosysteme	22
2.3. Veränderung des CO <sub>2</sub> -Senkenpotentials	25
2.4. Gesundheit	27
2.5. Versicherungswesen und Finanzsektor	29
2.6. Siedlungsgebiete, Energieverbrauch und Tourismus	31
3. Strategien zur Abschwächung der Klimaänderung	33
3.1. Technisches Potential zur Reduktion der Emissionen	33
3.2. Reduktion der CO <sub>2</sub> -Konzentration durch Kohlenstoffsinken	34
3.3. Hemmnisse und Marktunvollkommenheiten	36
3.4. Instrumente und Massnahmen	37
3.5. Kosten der Abschwächung der Klimaänderung	39
Literatur	42
Glossar	43

Noch hat das Satellitenbild des Alpenbogens grössere weisse Bereiche. Die alpinen Gletscher, die einen unermesslichen Wert unseres Landes ausmachen, sind deutlich erkennbar. Wie lange noch?

Der umfangreiche wissenschaftliche IPCC-Klimabericht, der von Hunderten von Forscherinnen und Forschern abgefasst und beurteilt wurde, zeigt die zu erwartenden Klimatrends und deren Folgen auf. Immer wieder gab es Zweifel, ob eine Erwärmung der Erdatmosphäre wirklich stattfindet. Nun sprechen die wissenschaftlichen Fakten eine deutliche Sprache: Der Treibhauseffekt verändert unsere Umwelt.

Im vorliegenden Bericht sind die für die Schweiz relevanten Aussagen des IPCC-Berichts zusammengefasst. Viele Folgen der Klimaänderung sind evident. Höhere Durchschnittstemperaturen lassen die Eismassen schmelzen. In der Schweiz sind die meisten Gletscher seit Jahren im Rückzug. Welche Konsequenzen wird die schwindende Schneesicherheit für die Wintersportorte haben? Höhere Temperaturen führen aber auch zum Rückgang der Permafrostböden. Instabile Böden, Rutschungen und Murgänge sind zu befürchten.

In unseren geographischen Breiten ist mit mehr Niederschlägen, häufigeren Unwettern und mehr Überschwemmungen zu rechnen. Damit werden grössere Schadenfälle – und mehr menschliches Leid – verbunden sein. Ein wärmeres Klima wird die Vegetationsdecke und die Zusammensetzung des Baumbestandes in den Wäldern verändern. Laubwälder sollen gegenüber Nadelwäldern bessere Wachstumsbedingungen vorfinden. Gewisse Pflanzen werden rascher wachsen. Was bedeutet dies für unser Ökosystem? Welche Auswirkungen sind für unsere Landwirtschaft zu erwarten?

Die Politik ist gefordert. Im 19. Jahrhundert hatten sich in der Schweiz Naturkatastrophen – Überschwemmungen, Steinschläge, Rutschungen und Lawinen gehäuft. Diese Katastrophen haben unsere Vorfahren vor 125 Jahren gezwungen, den Wald rigoros zu schützen. Es entstand das erste Forstgesetz. „Die Schweiz hat den Wald reden gehört, seine Warnungen ernst genommen und mit dem modernen Umweltschutz begonnen. Heute wollen wir nicht Katastrophen abwarten, sondern in der Umweltpolitik vorausschauend handeln,“ schreibt Bundespräsident Moritz Leuenberger. Das revolutionäre 125-jährige Forstpolizeigesetz beruhte auf dem Grundsatz der Nachhaltigkeit. Es durfte nur so viel Holz genutzt werden, wie nachwachsen konnte. Die Waldfläche musste konstant bleiben. Das Forstpolizeigesetz von 1876 war und ist internationales Vorbild.

So erwarte ich, dass unsere Regierung und unser Parlament vorausschauend die notwendigen Konsequenzen aus den Resultaten des Wissensstandsberichts des IPCC ziehen. Die Schweiz muss alles in ihrer Möglichkeit Stehende tun, um die Ursachen des weltumspannenden Problems der Klimaerwärmung zu beheben. Die aktive Beteiligung an der weltweiten Umsetzung der Kyoto-Protokolls ist notwendig. So wie unsere Vorfahren in weiser Voraussicht ein vorbildliches Schweizer Forstgesetz geschaffen haben. Es braucht aber auch möglichst viele persönliche Massnahmen zum sparsamen Umgang mit den fossilen Brenn- und Treibstoffen. Viele konstruktive Vorschläge liegen vor. Nehmen wir sie auf.



Nationalrätin Dr. Kathy Riklin  
Präsidentin des OcCC

---

# Vorwort

---

Der dritte Wissensstandsbericht (TAR) des zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderung (IPCC) wurde 2001 veröffentlicht. Am TAR haben über 2500 Fachpersonen mitgearbeitet. Der Bericht fasst auf über 3000 Seiten das vorhandene Wissen zusammen und hat einen gründlichen Begutachtungsprozess durchlaufen. Er besteht aus den drei Bänden der Arbeitsgruppen I, II und III sowie dem Synthesebericht (auf dem Web abrufbar unter [www.ipcc.ch/pub/tar](http://www.ipcc.ch/pub/tar)):

- Der Bericht der Arbeitsgruppe I (*Klimaänderung 2001: Die wissenschaftliche Basis*) behandelt das Klimasystem, die Ursachen der Klimaänderung, Analysen des vergangenen Klimas und Abschätzungen von zukünftigen Klimaänderungen sowie die Erkennung und Zuordnung von menschlichen Einflüssen auf das Klima der letzten 50 Jahre.
- Der Bericht der Arbeitsgruppe II (*Klimaänderung 2001: Auswirkungen, Anpassung und Anfälligkeit*) behandelt die Anfälligkeit, Anpassungsfähigkeit und Verwundbarkeit von natürlichen und sozioökonomischen Systemen bezüglich der Klimaänderung sowie die möglichen Folgen und Anpassungsmöglichkeiten auf regionaler und globaler Ebene.
- Der Bericht der Arbeitsgruppe III (*Klimaänderung 2001: Verminderung*) befasst sich mit den technologischen und biologischen Optionen zur Abschwächung der Klimaänderung, deren Kosten und Zusatznutzen, den Hindernissen für deren Anwendung sowie mit den politischen Anstrengungen, Massnahmen und Instrumenten zur Überwindung dieser Hindernisse.
- Der Synthesebericht (*Klimaänderung: Synthesebericht*) beantwortet Fragen zu bestimmten politischen Belangen, die im Zusammenhang mit der Rahmenkonvention zur Klimaänderung aufgebracht wurden.

IPCC wurde 1988 von der Welt-Meteorologie-Organisation (WMO) und dem Umwelt-Programm der Vereinten Nationen (UNEP) gegründet. Seit 1990 hat IPCC eine Reihe von Wissensstandsberichten, Spezialberichten, Technischen Dokumenten und anderen Produkten erarbeitet. Als Standardwerke werden sie von politischen Entscheidungsträgern, Forschenden und anderen Experten häufig gebraucht.

Das Beratende Organ für Fragen der Klimaänderung (OcCC) hat sich zur Aufgabe gemacht, die für die Schweiz wichtigsten Aussagen der Berichte der Arbeitsgruppen I, II und III in allgemein verständlicher Sprache darzustellen. 21 Fachpersonen wurden damit beauftragt, einzelne Kapitel zu lesen und die relevanten Aussagen für die Schweiz zusammenzufassen. Die Autoren waren angehalten, sich inhaltlich möglichst genau an die Vorlage zu halten und neue oder eigene Forschungsergebnisse, die im TAR nicht berücksichtigt sind, zu ignorieren. Ihr Interpretationsspielraum bestand in der Auswahl und Gewichtung der Aussagen. Die Zusammenfassung wurde von sechs unabhängigen Fachpersonen begutachtet und revidiert. Um den Bezug zur Schweiz zu verstärken, wird der Bericht ergänzt durch sieben Texte von Experten zu ausgewählten Themen (gelb unterlegt). Sie enthalten auch Informationen, die nicht Teil des TAR sind. Der vorliegende Bericht wurde am 10. Januar 2002 vom OcCC gutgeheissen.

Mit dieser Zusammenfassung möchte das OcCC den Inhalt des TAR einer breiteren interessierten Leserschaft zugänglich machen. Als weitere Dienstleistung wurden die Zusammenfassungen für politische Entscheidungsträger der drei Arbeitsgruppen und der Synthesebericht von ProClim- und dem OcCC in Zusammenarbeit mit deutschen und österreichischen Forschungsorganisationen übersetzt. Die Berichte können auf Deutsch und Französisch bei ProClim- bezogen werden.

---

# Zusammenfassung

---

Der dritte Wissensstandsbericht (TAR) des IPCC liegt vor. Eine Arbeitsgruppe des OcCC hat die wichtigsten Ergebnisse des TAR aus der Sicht der Schweiz zusammengefasst:

## **Beobachtungen zeigen insgesamt eine Erwärmung der Erde und weitere Veränderungen des Klimasystems.**

Die 1990er Jahre waren wahrscheinlich das wärmste Jahrzehnt und 1998 war das wärmste Jahr der letzten 1000 Jahre. Im 20. Jahrhundert nahmen Niederschläge über den Kontinenten in mittleren bis hohen Breiten der Nordhemisphäre zu. Schnee- und Eisbedeckung nahmen ab und der Meeresspiegel ist angestiegen.

Der grösste Teil des Temperaturanstiegs der letzten 50 Jahre ist wahrscheinlich den Aktivitäten des Menschen zuzuschreiben. Die Konzentrationen der Treibhausgase Kohlendioxid, Methan und Lachgas haben seit Beginn der Industrialisierung stark zugenommen. Klimamodelle können die beobachtete Erwärmung der letzten 50 Jahre nur simulieren, wenn sie den Anstieg der Treibhausgase berücksichtigen.

Menschliche Einflüsse werden die Zusammensetzung der Atmosphäre weiter verändern. Bis Ende des 21. Jahrhunderts wird die globale mittlere Temperatur um 1.4 bis 5.8°C steigen. Die Temperatur wird über Land und im Alpenraum sehr wahrscheinlich stärker ansteigen als im globalen Mittel. Schnee- und Eisbedeckung werden weiter abnehmen und der Meeresspiegel wird weiter ansteigen.

Die durch den Menschen verursachte Klimaänderung wird mehrere Jahrhunderte andauern. Eine Stabilisierung des atmosphärischen CO<sub>2</sub>-Gehaltes verlangt, dass die globalen Emissionen unter die heutigen Werte gesenkt werden. Langfristig müssten die Emissionen auf einen Bruchteil der heutigen Werte abfallen.

## **Die Klimaänderung hat Auswirkungen auf Natur und Gesellschaft.**

Als Folge der Klimaänderung wird der Rückgang der Gletscher und des Permafrosts in den Bergen anhalten. In den Alpen werden die Niederschläge in Form von Schnee abnehmen und in einzelnen Regionen sogar ganz ausbleiben. In vielen Regionen dürften insbesondere im Winter Häufigkeit und Stärke der Hochwasser zunehmen.

Die Wirkung der Klimaänderung auf Ökosysteme ist regional unterschiedlich und erfolgt im Zusammenspiel mit anderen Umwelteinflüssen. Die Artenzusammensetzung der natürlichen Ökosysteme wird sich verändern. In der Landwirtschaft wird die ertragssteigernde Wirkung erhöhter CO<sub>2</sub>-Konzentrationen und wärmerer Temperaturen durch andere Faktoren begrenzt.

Durch die Klimaänderung ist anfänglich mit einer Zunahme der Senkenwirkung von Landökosystemen zu rechnen. Bei einer sich weiter fortsetzenden Klimaänderung können sich die Ökosysteme aber auch wieder in Kohlenstoff-Quellen verwandeln.

In gemässigten Klimazonen werden wärmere Sommer und häufigere Hitzewellen zu mehr Todesfällen führen. Gesundheitliche Auswirkungen der Luftverschmutzung werden durch die Klimaänderung wahrscheinlich noch verstärkt. Die Verbreitung und Häufigkeit von Infektionskrankheiten wird sich verändern.

Volkswirtschaftliche und versicherte Schäden durch wetterbedingte Naturkatastrophen haben global stark zugenommen. Im Finanzsektor sind vor allem die Versicherungen direkt betroffen. Ein klarer Zusammenhang zwischen wachsenden Schäden und Klimaänderung lässt sich noch nicht herstellen.

## **Es gibt Möglichkeiten, die Emissionen von Treibhausgasen durch technische Massnahmen zu senken und den Anstieg der Treibhausgaskonzentrationen durch biologische Massnahmen abzuschwächen.**

Fehlende ökonomische und ausbleibende politische Massnahmen erschweren oft die technisch mögliche Reduktion der Treibhausgasemissionen. Hemmnisse und Marktunvollkommenheit behindern die Verbreitung von Technologien und Verfahrensweisen.

Zur Reduktion der Treibhausgase stehen zahlreiche Politikoptionen zur Verfügung. Dabei ermöglicht eine Kombination von Massnahmen eine erfolgreiche Klimapolitik. International sollten die Massnahmen und politischen Strategien koordiniert und harmonisiert werden.

Eine zentrale Rolle spielen die Kosten der Massnahmen zur Abschwächung der Klimaänderung. Durch die flexiblen Mechanismen des Kyoto-Protokolls können sie entscheidend gesenkt werden. Es besteht kein Zusammenhang zwischen der Höhe einer CO<sub>2</sub>-Steuer und der Entwicklung des BIP.

# 1. Beschreibung der globalen Klimaänderung

Im ersten Kapitel sind die für die Schweiz wichtigsten Aussagen der Arbeitsgruppe I des dritten Wissensstandsberichts (TAR) des IPCC zusammengefasst. Der Bericht zeigt auf fast 900 Seiten die Erkenntnisse der Klimaforschung der letzten 5 Jahre bezüglich der Klimaänderung.

Die Klimaänderung ist ein globaler Prozess. Ihre Beschreibung hat deshalb auch im Rahmen dieser Zusammenfassung globalen Charakter. Behandelt werden die bisherige beobachtete Klimaänderung, die Veränderung der Strahlungsbilanz der Erde, die Ursachen der beobachteten Klimaänderung, die Abschätzung der künftigen Klimaänderung und die Szenarien zur Stabilisierung der Treibhausgase.

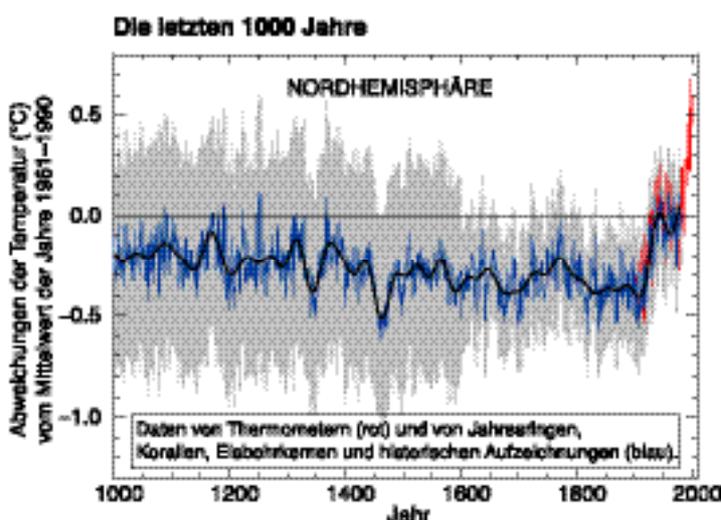
Für Abschätzungen der Unsicherheit werden in diesem Kapitel die Begriffe der Arbeitsgruppe I des IPCC verwendet: *praktisch sicher* (>99% Wahrscheinlichkeit, dass die Aussage zutrifft), *sehr wahrscheinlich* (90–99%), *wahrscheinlich* (66–90%), *mittlere Wahrscheinlichkeit* (33–66%), *unwahrscheinlich* (10–33%), *sehr unwahrscheinlich* (1–10%), *äusserst unwahrscheinlich* (<1%).

## 1.1. Beobachtete Klimaänderung

Beobachtungen zeigen insgesamt eine Erwärmung der Erde. Die mittlere Oberflächentemperatur der Nordhemisphäre ist im 20. Jahrhundert wahrscheinlich stärker angestiegen als in vergleichbaren Perioden während der letzten 1000 Jahre. Die 1990er Jahre waren wahrscheinlich das wärmste Jahrzehnt und 1998 war das wärmste Jahr der letzten 1000 Jahre. Zugleich nahmen Schnee- und Eisbedeckung im 20. Jahrhundert ab, Niederschläge sehr wahrscheinlich zu, und der Meeresspiegel ist angestiegen.

### Die Erde wird wärmer:

Die Temperaturschwankungen der letzten 1000 Jahre können deutlich besser abgeschätzt werden als noch 1995 im zweiten Wissensstandsbericht (SAR). Dies ermöglicht, den Temperaturanstieg des 20. Jahrhunderts in eine längerfristige Perspektive

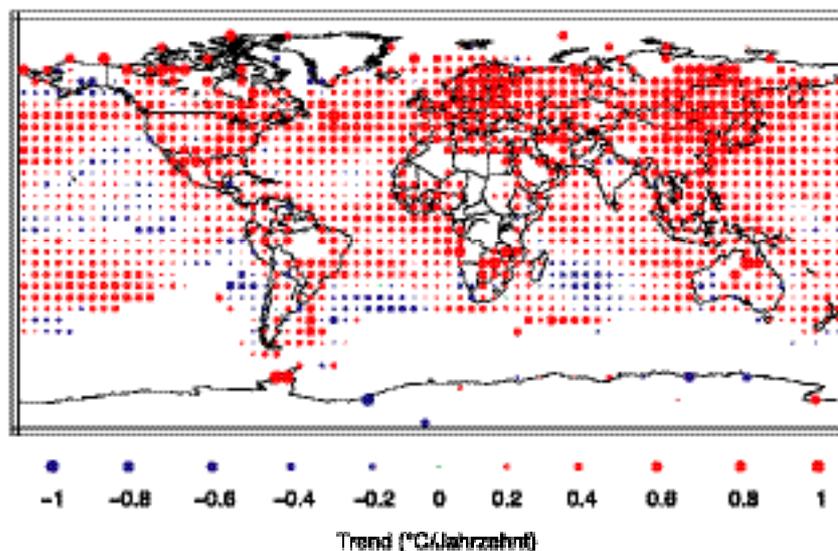


**Abbildung 1:** Temperaturanstiege wie seit 1910 sind in dieser Dauer und Grösse in den letzten 1000 Jahren nie aufgetreten. Direkte Messungen in Rot, rekonstruierte Werte in Blau, Mittelwertskurve (50-Jahr gleitendes Mittel) in Schwarz. Unsicherheiten (grau) werden mit zunehmendem Alter der Daten grösser.

einzuordnen (Abbildung 1). Während des 11. bis 14. Jahrhunderts waren die Temperaturen auf der Nordhemisphäre wärmer als während des 15. bis 19. Jahrhunderts (Kleine Eiszeit). Es gibt jedoch keine Hinweise, dass diese Schwankung weltweit gleichzeitig erfolgte. Die anhaltende globale Erwärmung im 20. Jahrhundert kann nicht einfach als Ausklang der Kleinen Eiszeit gedeutet werden, da in den letzten 1000 Jahren Temperaturanstiege dieser Dauer und Grösse nicht aufgetreten sind.

Die beobachtete Erwärmung im 20. Jahrhundert erfolgte in zwei Phasen, nämlich von 1910 bis 1945 und ab 1975. Auf der Nordhemisphäre betrug die Erwärmung in der ersten Phase  $(0.17 \pm 0.03)^\circ\text{C}/\text{Jahrzehnt}$  und ab 1975  $(0.24 \pm 0.07)^\circ\text{C}/\text{Jahrzehnt}$ . Die Erwärmung war deutlich stärker auf der Nord- als auf der Südhemisphäre (Abbildung 2). Nachttemperaturen sind stärker angestiegen als Tagestemperaturen, was zu einer Verlängerung der frostfreien Jahreszeit geführt hat.

Temperatortrends 1976 bis 2000



**Abbildung 2:** Die Nordhemisphäre hat sich stärker erwärmt als die Südhemisphäre. Trends der Oberflächentemperatur in  $^\circ\text{C}$  pro Jahrzehnt, aus den Jahresmitteltemperaturen von 1976 bis 2000. Die Trends sind durch die Grössen der Punkte gekennzeichnet (Erwärmung rot, Abkühlung blau).

### Weniger Schnee und Eis:

Seit 1960 ist die Ausdehnung der Schneebedeckung auf der Nordhemisphäre sehr wahrscheinlich um etwa 10% zurückgegangen. Weltweit ziehen sich die Gletscher in den Bergregionen seit Mitte des 19. Jahrhunderts zurück. Obwohl die Temperaturen in den Tropen seit 1980 nur schwach angestiegen sind, ist dort ein schneller Rückzug der Gletscher zu verzeichnen. Die Ausdehnung der arktischen Meereisdecke im Frühjahr und Sommer hat seit 1950 um 10 bis 15% abgenommen, die Dicke ist in dieser Periode sogar um 40% geschrumpft. In der Antarktis wurde dagegen eine schwache Vergrösserung der Meereisfläche festgestellt.

### Mehr Niederschläge:

Im 20. Jahrhundert haben die Niederschläge auf den Kontinenten in den mittleren bis hohen Breiten der Nordhemisphäre sehr wahrscheinlich um 0.5 bis 1% pro Jahrzehnt zugenommen. Messungen und Satellitenbeobachtungen zeigen, dass der Wasserdampfgehalt der Atmosphäre seit den 1970er Jahren wahrscheinlich um mehrere Prozent pro Jahrzehnt gestiegen ist. Die Wolkenbedeckung hat im 20.

Jahrhundert in mittleren und hohen geographischen Breiten wahrscheinlich um 2% zugenommen. Mehr Wolken haben zu der beobachteten Verringerung der Tagesschwankungen der Temperaturen beigetragen.

In Regionen, in denen der Niederschlag gesamthaft zugenommen hat, sind sehr wahrscheinlich auch schwere und extreme Niederschlagsereignisse häufiger aufgetreten. Hingegen gibt es keine Hinweise, dass die Häufigkeit und Stärke von tropischen und aussertropischen Stürmen zugenommen hat.

### Temperaturentwicklung in der Schweiz im 20. Jahrhundert

Der Temperaturanstieg im 20. Jahrhundert ist in der Schweiz deutlich stärker als im globalen Mittel. Die Zunahme ist wie beim globalen Mittel hauptsächlich auf den starken Anstieg in den letzten drei Jahrzehnten zurückzuführen.

In den Schweizer Stationen ist kein signifikanter Unterschied in der Entwicklung zwischen verschiedenen Höhengniveaus zu erkennen. Dagegen sind regionale Unterschiede zwischen der West- und Ostschweiz und zwischen der Alpennordseite und der Alpensüdseite erkennbar. Für das 20. Jahrhundert ergeben sich folgende lineare Trends<sup>1</sup>:

- Deutschschweiz<sup>2</sup> : 1.3 °C (1.2 – 1.5)
- Westschweiz<sup>3</sup> : 1.6 °C (1.5 – 1.7)
- Alpensüdseite<sup>4</sup> : 1.0 °C

Das entsprechende globale Mittel beträgt 0.6°C.

Auch in den letzten 30 Jahren ist die Temperaturzunahme in der Schweiz mit rund 0.4 – 0.6 °C pro Jahrzehnt deutlich grösser als im globalen Mittel (0.1 – 0.2 °C pro Jahrzehnt). Die linearen Trends 1971 bis 2000 sind in mittleren Höhenlagen und auf der Alpensüdseite etwas tiefer (ca. 0.5°C/ Jahrzehnt) als im Mittelland (ca. 0.6°C/ Jahrzehnt).

Für die im Vergleich zum globalen Mittel deutlich stärkere Temperaturzunahme in der Schweiz gibt es viele mögliche Gründe, wobei wahrscheinlich mehrere Faktoren beteiligt sind. Es sind dies zum Beispiel:

- Die Temperatur über den Landmassen nimmt allgemein stärker zu als das globale Mittel.
- Die Abnahme der Schneebedeckung in Gebirgsräumen führt durch die Änderung der Albedo (bzw. der Absorption der Sonnenstrahlung) zu einer zusätzlichen Erwärmung (positive Feedback).
- Interne Schwankungen im Klimasystem mit Perioden von einigen Jahrzehnten (z.B. Nordatlantische Oszillation) können durch Überlagerung zu einer Verstärkung (oder auch Abschwächung) der Erwärmung führen. Solche natürlichen Schwankungen könnten allerdings auch durch die globale Erwärmung dauerhaft verändert werden.

Welcher dieser Faktoren wieviel zur Verstärkung der Erwärmung beiträgt, ist nur schwer abzuschätzen. Durch zur Zeit noch nicht vorliegende statistische Analysen liesse sich ev. der Anteil, der über zufällige Schwankungen hinausgeht, bestimmen. Regionale physikalische Modellrechnungen zeigen im Übrigen fast durchwegs ebenfalls eine verstärkte Erwärmung im Alpenraum. Zur Zeit deutet nichts auf eine Abschwächung des Trends der letzten 30 Jahre hin.

*Dr. Urs Neu*

<sup>1</sup> Für die Trendberechnung wurden die homogenisierten Messreihen (Jahresmittel, 12 Stationen) der Monatsdatenbank der MeteoSchweiz verwendet.

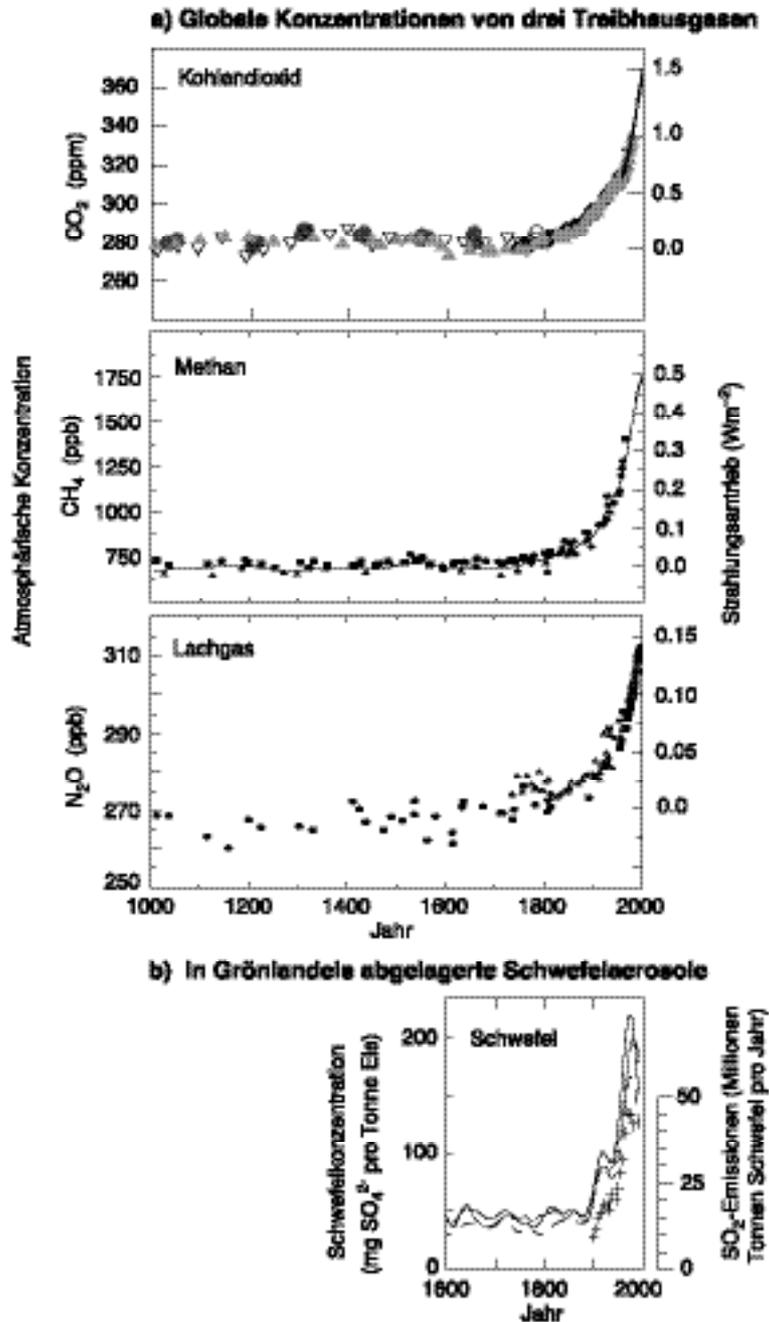
<sup>2</sup> Säntis, Davos, Zürich, Engelberg, Bern, Basel, Chaumont

<sup>3</sup> Chateaux d'Oex, Sion, Genf

<sup>4</sup> Lugano, Sils-Maria

### Der Meeresspiegel steigt:

Aufgrund von Gezeitenmessungen wird gefolgert, dass der Meeresspiegel während der letzten 100 Jahre um 1 bis 2 mm pro Jahr angestiegen ist. Die durchschnittliche Erhöhung war im 20. Jahrhundert grösser als im Jahrhundert davor.



**Abbildung 3:** (a) Die Konzentrationen der drei Treibhausgase Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>), Methan (CH<sub>4</sub>) und Lachgas (N<sub>2</sub>O) in der Atmosphäre steigen seit dem Beginn des industriellen Zeitalters (1750) markant an. Messungen für die letzten 1000 Jahre in Luftblasen aus verschiedenen polaren Eisbohrkernen als Symbole, direkte Messungen für die letzten Jahrzehnte als Kurve (Kohlendioxid) oder Kurventeil (Methan). (b) Die Schwefelkonzentration in grönländischem Eis (Kurven) ist ein Mass für die regionale Konzentration von Schwefelaerosolen in der Atmosphäre. Die seit 1900 gemessenen Schwefelemissionen (+) steigen in ähnlicher Weise an.

## 1.2. Veränderung der Strahlungsbilanz der Erde

**Menschliche Aktivitäten, die mit Emissionen von Aerosolen und Treibhausgasen verbunden sind, verändern die Atmosphäre und damit die Strahlungsbilanz der Erde (Summe von Ein- und Abstrahlung). Davon wird eine Jahrhunderte andauernde Wirkung auf das Klima erwartet. Natürliche Faktoren (Sonneneinstrahlung und vulkanische Aerosole) haben dagegen wenig zur Veränderung der Strahlungsbilanz während der letzten 100 Jahre beigetragen.**

Treibhausgasen in der Atmosphäre sind wichtig für das Leben auf der Erde. Sie verändern die Strahlungsbilanz der Erde, weil sie zwar für die kurzwellige Sonneneinstrahlung (UV-Strahlung) durchlässig sind, aber die langwellige Abstrahlung der Erde (Infrarot-Strahlung) zum Teil zurückhalten. Dadurch erwärmt sich die Erde und wird bewohnbar. Dieser natürliche Effekt wird durch die menschliche Produktion von Treibhausgasen verstärkt.

### Mehr Treibhausgasen in der Atmosphäre:

Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ ), Methan ( $\text{CH}_4$ ) und Lachgas ( $\text{N}_2\text{O}$ ) sind neben Wasserdampf die wichtigsten Treibhausgasen. Ihre Konzentrationen haben in den letzten 200 Jahren stark zugenommen (Abbildung 3a). Seit 1750 sind die  $\text{CO}_2$ - und die Methankonzentrationen um 31% beziehungsweise 151% angestiegen und sind höher als je zuvor in den letzten 420'000 Jahren. Seit mindestens 20'000 Jahren wurde kein so schneller  $\text{CO}_2$ -Anstieg beobachtet.

Etwa 75% der  $\text{CO}_2$ -Emissionen der letzten 20 Jahre sind auf die Verbrennung fossiler Energieträger (Erdöl, Kohle, Gas) zurückzuführen, und etwa 25% auf veränderte Landnutzung, vor allem Abholzung von Wäldern. Die Emission durch Landnutzungsänderung wurde in den letzten 20 Jahren allerdings durch eine vermehrte Aufnahme von Kohlenstoff durch die Vegetation in den Tropen und mittleren Breiten überkompensiert. Diese  $\text{CO}_2$ -Senken sind möglicherweise durch grösseres Pflanzenwachstum dank höherer atmosphärischer  $\text{CO}_2$ -Konzentration und erhöhtem Eintrag von Stickstoff sowie durch das Nachwachsen von Wäldern in brachliegenden Gebieten mittlerer Breite entstanden.

Der durch menschliche Aktivitäten bedingte Anstieg der Treibhausgaskonzentrationen erhöht die Strahlungsbilanz der Troposphäre um etwa  $+2.43 \text{ Wm}^{-2}$ . Die Veränderung mit positivem Vorzeichen bedeutet eine Erwärmung der Troposphäre. Zu diesem zusätzlichen Treibhauseffekt trägt heute  $\text{CO}_2$  etwa  $1.46 \text{ Wm}^{-2}$ , Methan etwa  $0.48 \text{ Wm}^{-2}$  und Lachgas etwa  $0.15 \text{ Wm}^{-2}$  bei. Weitere Treibhausgasen sind halogenierte Kohlenwasserstoffe ( $0.34 \text{ Wm}^{-2}$ ) und troposphärisches Ozon ( $0.35 \text{ Wm}^{-2}$ ).

### Unsicherer Einfluss der Aerosole:

Aerosole, kleinste Schwebeteilchen aus Verbrennungsprozessen (Schwefel, Russ und organische Kohlenstoffteilchen), tragen im Allgemeinen zu einer Abkühlung bei, indem sie einfallendes Sonnenlicht streuen. Messungen in Grönlandeis zeigen, dass die Aerosolkonzentrationen in der Atmosphäre seit 1900 stark gestiegen sind und erst Ende des 20. Jahrhunderts dank technologischer Fortschritte wieder sinken (Abbildung 3b). Ihr Einfluss auf die Strahlungsbilanz ist aber nach wie vor unsicher ( $\pm 2 \text{ Wm}^{-2}$ ).

### Geringer Einfluss von Sonne und Vulkanen:

Die letzten zwei Sonnenaktivitätszyklen (11-Jahres-Zyklus) bewirkten gemäss Satellitenmessungen jeweils Schwankungen der Strahlungsbilanz im Bereich von etwa  $0.2 \text{ Wm}^{-2}$ . Über die gesamte Zeit seit 1750 wird der Einfluss der Sonnenaktivität auf die Strahlungsbilanz auf  $(0.3 \pm 0.2) \text{ Wm}^{-2}$  geschätzt. Schwankungen auf längeren Zeitskalen könnten grössere Veränderungen verursacht haben, doch sind

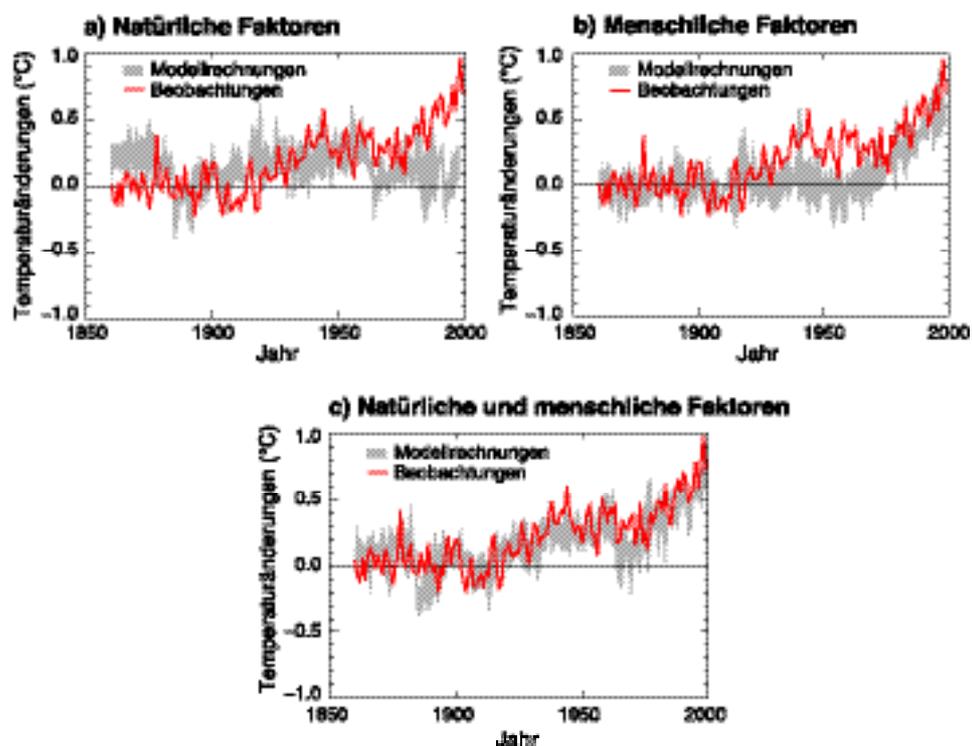
deren Abschätzungen noch ungenügend abgesichert. Verglichen mit der Erhöhung der Strahlungsbilanz um  $2.43 \text{ Wm}^{-2}$  durch den Anstieg der Treibhausgaskonzentrationen sind sie relativ klein.

Kleine Schwankungen der Sonneneinstrahlung und eine verstärkte Vulkanaktivität zwischen 1960 und 1991 hatte gesamthaft eine abkühlende Wirkung während der letzten 20 und wahrscheinlich während der letzten 40 Jahre.

### 1.3. Die Ursache der Klimaänderung der letzten 50 Jahre

**Aufgrund neuer und klarer Belege ist wahrscheinlich, dass der grösste Teil des Temperaturanstiegs der letzten 50 Jahre den Aktivitäten des Menschen zuzuschreiben ist. Simulationen mit Klimamodellen, die die Erhöhung der Treibhausgase nicht berücksichtigen, können die Erwärmung der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts nicht erklären.**

Die heutigen computergestützten Klimamodelle können die beobachtete Erwärmung der letzten 50 Jahre nur quantitativ simulieren, wenn sie den Anstieg der Treibhausgase berücksichtigen (Abbildung 4). Bis etwa 1950 beeinflussen natürliche Schwankungen der Strahlungsbilanz aufgrund von Sonnenzyklen und Vulkanausbrüchen die mittlere globale Temperatur wesentlich. Der Temperaturanstieg nach 1950 ist jedoch nicht mit natürlichen Faktoren allein erklärbar. Mehrere Simulationen mit leicht unterschiedlichen Anfangsbedingungen bestätigen dieses Resultat.



**Abbildung 4:** Die Erwärmung der letzten 50 Jahre kann ohne den Beitrag der Treibhausgase und Aerosole nicht quantitativ simuliert werden. Veränderung der globalen mittleren Temperatur von 1850 bis 2000 basierend auf vier Modellsimulationen (graues Band) im Vergleich mit den beobachteten Temperaturen (rote Kurve). Drei Einflüsse auf die Strahlungsbilanz wurden untersucht: (a) natürliche Faktoren (Sonnenzyklen und Vulkanaktivität); (b) menschliche Faktoren (Anstieg der Treibhausgase und der Aerosole); (c) Berücksichtigung der natürlichen und menschlichen Faktoren.

Dank neuer statistischer Methoden und Modelle können die beobachteten Veränderungen der letzten Jahrhunderte verschiedenen Ursachen zugeordnet werden. Die meisten Studien zeigen, dass die deutliche Erwärmung während der letzten 50 Jahre dem Anstieg der Treibhausgase zugeschrieben werden kann. Die in diesen Studien berücksichtigten Ursachen der Veränderung der Strahlungsbilanz können die beobachteten Temperaturveränderungen vollständig erklären. Dies schließt nicht aus, dass auch andere Effekte zur beobachteten Erwärmung beigetragen haben könnten. Unsicher sind nach wie vor die Abschätzung der natürlichen Klimaschwankungen, die verschiedenen Einflüsse der Aerosole und die Rekonstruktion der Stärke von Sonneneinstrahlung und Vulkanaktivität. Trotz dieser Unsicherheiten ist für die letzten 50 Jahre der Effekt der vom Menschen verursachten Treibhausgase sichtbar.

## 1.4. Abschätzung künftiger Veränderungen bis 2100

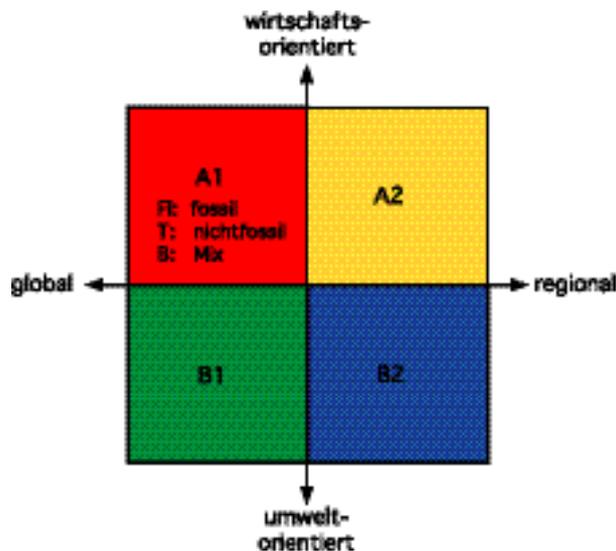
**Menschliche Einflüsse werden die Zusammensetzung der Atmosphäre weiterverändern. Die mittlere globale Temperatur steigt in allen Szenarien ohne klimapolitische Massnahmen an. In nördlichen Breiten werden die Niederschläge wahrscheinlich zunehmen.**

### Verschiedene Szenarien:

Für den IPCC-Spezialbericht über Emissions-Szenarien (*Special Report on Emission Scenarios*, SRES) wurden 40 Szenarien entwickelt, die die möglichen Emissionen wichtiger Treibhausgase und Aerosole für die Periode zwischen 1990 und 2100 beschreiben. Die Szenarien bilden die Grundlage für die Modelle zur Vorhersage des zukünftigen Klimas. Sie beruhen auf unterschiedlichen, aber plausiblen Annahmen über die technologische Entwicklung, die Bevölkerungsentwicklung, das wirtschaftliche Wachstum und die Globalisierung. Sie beinhalten jedoch keine politischen Massnahmen zur Verminderung der Klimaänderung.

Die Szenarien lassen sich in vier Familien A1, A2, B1 und B2 unterteilen, die je einem Sektor des Quadrates in Abbildung 5 entsprechen. A1 und A2 sind somit eher wirtschaftsorientiert, während B1 und B2 eher auf nachhaltiger Entwicklung beruhen. A1 und B1 sind eher global, A2 und B2 rechnen dagegen mit regionalen Unterschieden. Abweichende Szenarien innerhalb einer Familie sind in Gruppen gegliedert, wie in Familie A1 die Gruppen FI, T und B. Die sechs Szenarien A1FI, A1T, A1B, A2, B1 und B2 heissen *illustrative Szenarien* und stehen, als jeweils eine mögliche Entwicklung der Menschheit, stellvertretend für die verschiedenen Szenarien des entsprechenden Sektors:

- A1, wirtschaftsorientiert und global: Schnelles wirtschaftliches Wachstum, Bevölkerungshöhepunkt um 2050, schnelle Einführung neuer und effizienter Technologien, Verkleinerung der globalen ökonomischen Unterschiede. Die drei Szenariengruppen, die je eine unterschiedliche technologische Entwicklung des Energiesystems beschreiben, sind A1FI (fossile Energiequellen), A1T (nicht-fossile Energiequellen) und A1B (ausgewogener Energie-Mix).
- A2, wirtschaftsorientiert und regional: Ungleiche Entwicklung der Welt, steigende Bevölkerung, regional unterschiedliche, sich langsam entwickelnde und wenig vernetzte Ökonomien.
- B1, nachhaltigkeitsorientiert und global: Schneller Wechsel zu einer Dienstleistungs- und Informationsgesellschaft, Bevölkerungshöhepunkt um 2050, schnelle Einführung neuer und effizienter Technologien, Angleichung der Kontinente, „weltweite Nachhaltigkeit“.



**Abbildung 5:** Die vier Familien A1, A2, B1 und B2 der IPCC-Emissions-Szenarien entsprechen je einem Sektor des Szenarienquadrats. Ein repräsentatives, so genannt illustratives Szenario vertritt die verschiedenen möglichen Szenarien innerhalb jedes Sektors. Die Familie A1 wird durch die drei Szenarien FI, T und B vertreten, die andere Energiesysteme einsetzen und sich in ihren Konsequenzen stark unterscheiden.

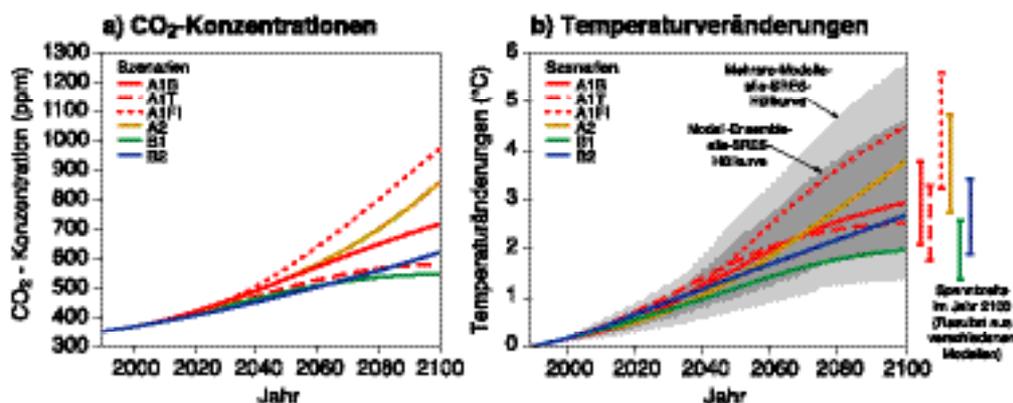
- B2, nachhaltigkeitsorientiert und regional: Regionale Lösung der Probleme, langsam steigende Bevölkerung, mässiges Wirtschaftswachstum mit regionalen Unterschieden, „lokale Nachhaltigkeit“.

### CO<sub>2</sub>-Emissionen im 21. Jahrhundert:

Die verschiedenen Szenarien führen zu einer grossen Bandbreite möglicher Emissionsverläufe. Für die sechs illustrativen Szenarien liegen die kumulierten Emissionen von Kohlendioxid bis 2100 im Bereich von 980 bis 2100 Gigatonnen Kohlenstoff (1 GtC = 10<sup>12</sup> kg Kohlenstoff = 3.67 10<sup>12</sup> kg CO<sub>2</sub>). Zum Vergleich: die Atmosphäre enthielt zu vorindustrieller Zeit 590 GtC und die fossilen Ressourcen werden auf ungefähr 5000 GtC geschätzt.

### Treibhausgaskonzentrationen im 21. Jahrhundert:

Die kombinierte Wirkung aller Treibhausgase und Aerosole führt für jedes SRES-Szenario zu einer positiven Änderung der Strahlungsbilanz (Erwärmung) der Erdoberfläche und der unteren Atmosphäre. Die Veränderungen der atmosphärischen Konzentrationen von Treibhausgasen und Aerosolen sowie die Klimaänderung wurden mit Modellen abgeschätzt. Für die sechs illustrativen Szenarien steigt die atmosphärische CO<sub>2</sub>-Konzentration bis ins Jahr 2100 auf 540 bis 970 ppm an, 90 bis 250% über die vorindustrielle Konzentration von 280 ppm (Abbildung 6a). Da das Verständnis des Kohlenstoffkreislaufes noch unvollständig ist, wird die relative Unsicherheit dieser Projektionen auf –10% bis +30% geschätzt. Es ist aber praktisch sicher, dass hauptsächlich die Freisetzung von CO<sub>2</sub> bei der Nutzung fossiler Brennstoffe diesen Anstieg des atmosphärischen CO<sub>2</sub> verursacht. Veränderte Landnutzungen, wie zum Beispiel in Artikel 3.3 und 3.4 des Kyoto-Protokolls erwähnt, können als Kohlenstoff-Senken die atmosphärische CO<sub>2</sub>-Konzentration beeinflussen. Solche Massnahmen reduzieren die atmosphärische CO<sub>2</sub>-Konzentration um maximal 40 bis 70 ppm bis ins Jahr 2100, also nur um ungefähr 10% der Zunahme in den illustrativen Szenarien.



**Abbildung 6:** (a) Modellrechnungen des globalen Kohlenstoffkreislaufes zeigen, dass die atmosphärische CO<sub>2</sub>-Konzentration in den nächsten 100 Jahren für die sechs illustrativen SRES-Szenarien auf 540 bis 970 ppm ansteigen wird. (b) Für die SRES-Szenarien wird vorausgesagt, dass die globale mittlere Temperatur von 1990 bis 2100 um 1.4 bis 5.8°C ansteigt. Mit Hellgrau ist der Bereich der Temperaturänderungen aus allen Szenarien und allen Modellen angegeben, mit Dunkelgrau der Bereich des Durchschnitts aller Modelle für alle Szenarien.

Die vorausgesagten Konzentrationen weiterer Treibhausgase (Methan, Ozon, Lachgas, halogenierte Verbindungen) variieren erheblich für die sechs illustrativen Szenarien. Beispielsweise nimmt die Methankonzentration von heute 1760 ppb um 190 ppb ab (Szenario B1) oder um bis zu 1970 ppb zu (Szenario A2). Die starke Zunahme der Emissionen von Treibhausgasen und anderen Luftschadstoffen führt in einigen Szenarien durch eine erhöhte Grundkonzentration von bodennahem Ozon zu einer starken Luftqualitätseinbuße. Als Folge des Einsatzes neuer Technologien zur Verbesserung der Luftreinhaltung fallen die globalen Emissionen von Schwefeldioxid und die mittlere Konzentration der Schwefelaerosole in allen illustrativen Szenarien bis 2100 unter die heutigen Werte ab. Damit vermindert sich die kühlende Wirkung der Schwefelaerosole auf die Erdoberflächentemperatur.

### Temperaturerhöhung im 21. Jahrhundert:

Von 1990 bis 2100 steigt die globale mittlere Temperatur um 1.4 bis 5.8°C (Abbildung 6b). Dieser Bereich ergibt sich aus den SRES-Szenarien und verschiedenen Klimamodellen. Die Erwärmung ist 2- bis 10-mal grösser als diejenige im 20. Jahrhundert und ist sehr wahrscheinlich einzigartig seit dem Ende der letzten Eiszeit vor ungefähr 10'000 Jahren.

Klimaänderungen sind regional sehr unterschiedlich. Es ist sehr wahrscheinlich, dass sich die Temperatur über Land und im Alpenraum stärker erhöht als im globalen Mittel. Es ist ebenfalls sehr wahrscheinlich, dass Häufigkeit und Intensität von sommerlichen Hitzewellen in ganz Europa zunehmen und dass die Anzahl Frosttage abnimmt.

### Niederschläge im 21. Jahrhundert:

Niederschläge werden wahrscheinlich in mittleren bis hohen nördlichen Breiten zunehmen. In den meisten Gebieten mit zunehmenden Niederschlägen werden Schwankungen im jährlichen Niederschlag sehr wahrscheinlich grösser. Für den Alpenraum zeigen die Modelle tendenziell eine Abnahme der Niederschläge im Sommer und eine Zunahme der Niederschläge im Winter.

Es ist wahrscheinlich, dass die Häufigkeit von Starkniederschlägen, vor allem im Winter, in Europa zunimmt. Für einige weitere extreme Wetterphänomene gibt

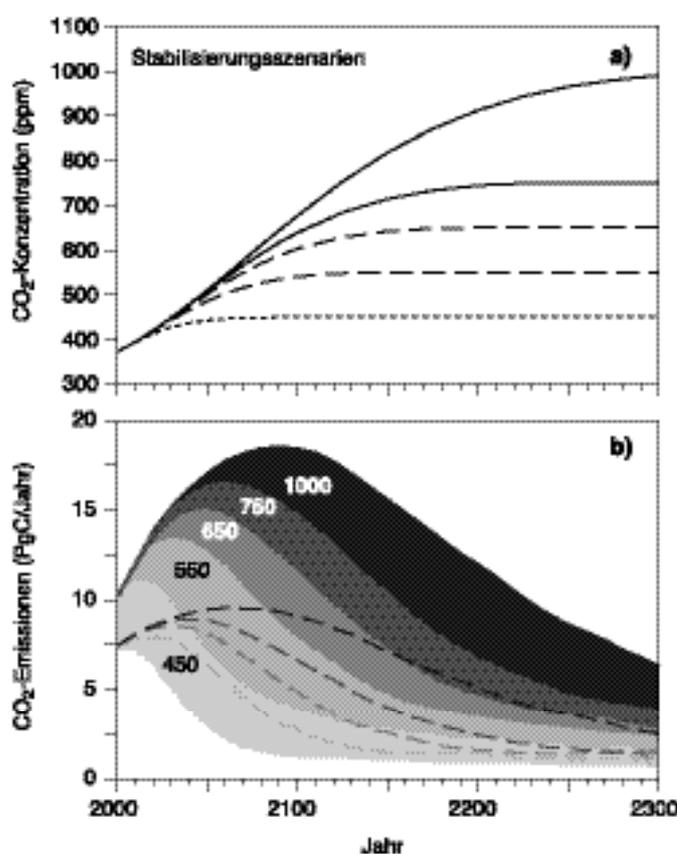
es zurzeit nur ungenügende Information, um Trends abschätzen zu können, weil die globalen Klimamodelle für verlässliche Vorhersagen noch nicht genügend räumlich aufgelöst sind. Zum Beispiel werden kleinräumige Wetterphänomene wie Gewitter, Tornados und Hagel in Klimamodellen nicht simuliert.

**Schnee- und Eisbedeckung im 21. Jahrhundert:**

Gemäss Modellstudien werden Schnee- und Meereisbedeckung auf der Nordhemisphäre weiter abnehmen und alpine Gletscher weiter abschmelzen.

**Meeresspiegelanstieg im 21. Jahrhundert:**

Der globale mittlere Meeresspiegel steigt von 1990 bis 2100 zwischen 9 cm und 88 cm an. Hauptursache ist die thermische Ausdehnung des Ozeans. Dieser Bereich ergibt sich aus den SRES-Szenarien und den verschiedenen Klimamodellen.



**Abbildung 7:** Die globalen CO<sub>2</sub>-Emissionen müssen unter die heutigen Werte gesenkt werden, um die atmosphärische CO<sub>2</sub>-Konzentration zu stabilisieren. (a) Verschiedene Szenarien für eine mittel- bis langfristige (50 bis über 300 Jahre) Stabilisierung der CO<sub>2</sub>-Konzentration, die möglich würde, falls die Emissionen in den entsprechenden Bereichen in (b) verlaufen. Der mögliche Bereich der Emissionen für jedes Profil (grau) gibt die Unsicherheiten im Verständnis des Kohlenstoffkreislaufes an. Wo die Bereiche überlappen, ist die untere Grenze der Unsicherheit gestrichelt angegeben.

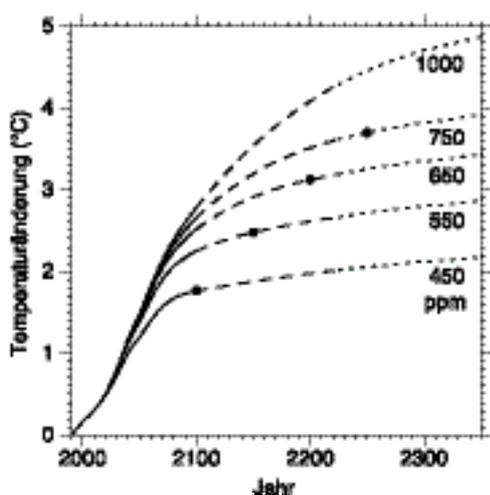
## 1.5. Stabilisierungsszenarien und ihre Konsequenzen

**Die durch den Menschen verursachte Klimaänderung wird mehrere Jahrhunderte andauern. Um die Veränderungen der Strahlungsbilanz und des Klimas zu begrenzen, ist es nötig, die Emissionen von Treibhausgasen zu senken. Eine Stabilisierung des atmosphärischen CO<sub>2</sub>-Gehaltes verlangt, dass die globalen Emissionen unter die heutigen Werte gesenkt werden.**

### CO<sub>2</sub> bleibt im Klimasystem:

CO<sub>2</sub>-Emissionen verändern die Zusammensetzung der Atmosphäre und das Klima über sehr lange Zeiträume. CO<sub>2</sub> aus der Verbrennung von fossilen Energieträgern wird praktisch nicht abgebaut, sondern im Klimasystem akkumuliert und zwischen Atmosphäre, Ozean und Biosphäre verteilt. Mehrere hundert Jahre nach der Freisetzung einer bestimmten Menge von CO<sub>2</sub> befindet sich immer noch ein Viertel davon in der Atmosphäre.

Modelle des Kohlenstoffkreislaufes zeigen, dass die Stabilisierung der atmosphärischen CO<sub>2</sub>-Konzentration eine Reduktion der globalen CO<sub>2</sub>-Emissionen unter die Emissionen von 1990 erfordert (Abbildung 7). Langfristig müssten die Emissionen auf einen Bruchteil der heutigen Werte abfallen. Für alle Szenarien, in denen die CO<sub>2</sub>-Konzentration zwischen 450 und 1000 ppm stabilisiert wird, beträgt die Erwärmung bis 2100 unter Berücksichtigung von Modellunsicherheiten weniger als 3,5°C (Abbildung 8). Damit wird der obere Bereich der für die SRES-Szenarien vorausgesagten Temperaturerhöhung (bis 5,8°C) vermieden. Je tiefer die CO<sub>2</sub>-Konzentration stabilisiert wird, desto kleiner bleibt die Temperaturänderung. Doch auch nach der Stabilisierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen steigen die Temperaturen noch jahrhundertlang weiter an, da die Ozeane sehr langsam reagieren.



**Abbildung 8:** Die globale mittlere Oberflächentemperatur steigt für alle CO<sub>2</sub>-Stabilisierungsszenarien aus Abbildung 7a bis 2100 weniger als 3,5°C. Ohne Stabilisierung könnte die Temperatur bis 5,8°C steigen. Die schwarzen Punkte zeigen den Zeitpunkt, an dem die CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Atmosphäre stabilisiert wird (vgl. Abbildung 7a). Die Temperatur steigt auch nach der Stabilisierung weiter an.

### Andere Treibhausgase werden abgebaut:

Methan, Ozon und Aerosole werden rasch abgebaut. Die Konzentrationen von troposphärischem Ozon (gesteuert durch Emissionen von CO, NO<sub>x</sub>, flüchtigen Kohlenwasserstoffen und Methan) und Aerosolen (Schwefel, Russ und organische Kohlenstoffteilchen) würden sich innerhalb von Tagen bis Wochen und die Konzentration von Methan innerhalb weniger Jahrzehnte nach dem Einfrieren der entsprechenden Emissionen stabilisieren.

Treibhausgase wie Lachgas und halogenierte Verbindungen werden abgebaut, sind aber langlebig. Um die Konzentrationen im Bereich der heutigen Werte zu stabilisieren, müssten ihre Emissionen daher ebenfalls gesenkt werden.

### Auswirkungen der Klimaänderung auf Gletscher und Permafrost in den Alpen

Das Eis des Hochgebirges reagiert besonders stark auf Klimaänderungen. Bei einem Schneegrenzanstieg von knapp 100 m hat die Gesamtheit der Alpengletscher seit der Mitte des letzten Jahrhunderts bis in die 1970er Jahre gut einen Drittel ihrer Fläche und rund die Hälfte ihrer Masse verloren. Allein in den letzten 20 Jahren dürfte nochmals ein Viertel bis ein Drittel des verbleibenden Volumens verloren gegangen sein.

Die Entwicklung des Permafrostes, dessen flächenhafte Verbreitung (ca. 5% der Landesfläche) in der Schweiz heute rund doppelt so gross ist wie die verbleibende Gletscherfläche, kann nicht so genau erfasst werden. Nach den neuesten Bohrresultaten scheint die Temperatur exponierter Felsgipfel im vergangenen Jahrhundert europaweit um rund 1°C zugenommen zu haben.

Nach plausiblen Treibhaus Szenarien dürfte die Schneegrenze in den Alpen bis zur Mitte des kommenden Jahrhunderts um etwa 200 m ansteigen. Ein wesentlicher Teil des zurzeit noch vorhandenen alpinen Gletschervolumens dürfte dabei abschmelzen, und ausgedehnte Permafrosthänge oberhalb der Waldgrenze könnten beschleunigt auftauen. In einem solchen Szenario würden sich Murgang- und Eissturzfahren im Hochgebirge räumlich verlagern und die Hochwassergefahr (jahres-)zeitlich ausdehnen. Langfristig dürfte die Stabilität hoch gelegener Felsflanken abnehmen, wo die Gletscher als Stützen verschwinden, die Temperatur in bisher gefrorenen Felspartien zum Schmelzpunkt ansteigt und sich ehemals eisgefüllte Klüfte für die Wasserzirkulation öffnen. Die Forschung auf diesem Gebiet ist allerdings noch am Anfang.

Am auffälligsten dürften die Veränderungen im Wasserkreislauf und der landschaftliche Wandel im Gebirge werden. Vor allem der Gletscherschwund wird ein leicht erkennbares Zeichen dafür sein, dass sich das Klima mit zunehmender Geschwindigkeit von der historischen Wissensbasis entfernt. Hinsichtlich Naturgefahren werden praxistaugliche, robuste Modelle mehr und mehr die traditionellen, lokal-empirischen Entscheidungsgrundlagen (Chroniken, stumme Zeugen, Statistiken usw.) ersetzen müssen. Dies erfordert die Zusammenarbeit zwischen Behörden und Wissenschaft in Kombination mit einer systematischen Beobachtung, die erkennen lässt, was tatsächlich – in der Natur nämlich – abläuft.

*Prof. Wilfried Haerberli*

---

## 2. Auswirkungen der Klimaänderung

---

Im zweiten Kapitel sind die für die Schweiz wichtigsten Aussagen der Arbeitsgruppe II des dritten Wissensstandsberichts (TAR) des IPCC zusammengefasst. Im Bericht der Arbeitsgruppe II werden auf über 900 Seiten die Anfälligkeit, Anpassungsfähigkeit und Verwundbarkeit von natürlichen und sozioökonomischen Systemen bezüglich der Klimaänderung sowie die möglichen Folgen und Anpassungsmöglichkeiten behandelt. Die Aussagen basieren auf Beobachtungen, Modellrechnungen und dem Verständnis von Prozessen und Systemen. Die Abschätzung des Zuverlässigkeitsgrades der Aussagen und des wissenschaftlichen Verständnisses erfolgt aufgrund der kollektiven Beurteilung der Autoren. In diesem Kapitel wird sie zu Gunsten der Leserlichkeit weggelassen.

Anfälligkeit, Anpassungsfähigkeit und Verwundbarkeit natürlicher und sozioökonomischer Systeme bezüglich der Klimaänderung sind regional sehr unterschiedlich. Weil konkrete Angaben zur Schweiz im Bericht weitgehend fehlen, werden in diesem Kapitel die Informationen von den Aussagen abgeleitet, die sich auf Zentraleuropa und Regionen mittlerer Breite beziehen. In der Folge werden die Auswirkungen der Klimaänderung auf den Wasserkreislauf, die Ökosysteme, die Gesundheit, das Versicherungswesen und den Finanzsektor sowie Siedlungsgebiete, Energieverbrauch und Tourismus behandelt.

### 2.1. Auswirkungen der Klimaänderung auf den Wasserkreislauf und die Wasserwirtschaft

**Der Einfluss langsamer, natürlicher Klimaschwankungen auf den Wasserkreislauf lässt sich nur schwer von Veränderungen unterscheiden, die durch den Menschen verursacht sind. Mit dem Klima wird sich die Verteilung der Abflüsse verändern. Intensivere Niederschläge und möglicherweise eine grössere jährliche Niederschlagsmenge werden häufigere Hochwasser provozieren.**

#### Veränderte Wassermengen in Flüssen:

Für die europäischen Gebiete mittlerer Breite zeigen die meisten Klimaänderungsszenarien bis 2050 eine durchschnittliche Zunahme des jährlichen Abflusses um 10% nördlich der Alpen, hingegen eine durchschnittliche Abnahme um 10% südlich der Alpen. Auch die jahreszeitliche Schwankung der Abflussmengen wird sich als Folge der Klimaerwärmung verändern. In den Alpen werden die Niederschläge in Form von Schnee abnehmen und in einzelnen Regionen sogar ganz ausbleiben. Für Gebiete ohne wesentliche Schneefälle zeigen Modellrechnungen generell einen erhöhten Abfluss im Winter aufgrund vermehrter Regenfälle. Wegen kleinerer Eis- und Schneeschmelze wird speziell südlich der Alpen ein verminderter Abfluss im Sommer vorausgesagt, der niedrige Wasserstände in den Flüssen zur Folge haben wird. Beobachtete Trends der Abflussmengen können allerdings nicht eindeutig bisherigen, vom Menschen verursachten Klimaänderungen zugeordnet werden. In einigen Einzugsgebieten wird der Einfluss der Klimaänderung kleiner, in anderen jedoch grösser sein als die natürlichen Schwankungen.

#### Häufigere Hochwasser:

Es gibt Hinweise, dass die Häufigkeit starker Niederschlagsereignisse generell mit der globalen Erwärmung zunimmt. In vielen Regionen dürften insbesondere im Winter Häufigkeit und Stärke der Hochwasser zunehmen.

Veränderungen im Wasserkreislauf sind in den Alpen bei den Quellen spürbar, wirken aber auch weit in die Gebiete der Flussunterläufe. Trockenzeiten und Hochwasser, wie z.B. jenes Anfang 1995 im Rheinbecken, werden häufiger auftreten.

### **Grösserer Wasserbedarf für Bewässerung:**

Die Klimaänderung dürfte keinen bedeutenden Einfluss auf den durchschnittlichen Wasserbedarf von Haushalten, Gewerbe und Industrie haben. Aber der Wasserbedarf der Landwirtschaft für die Bewässerung dürfte steigen. Es ist ungewiss, um wie viel der Wasserbedarf wegen vermehrter Transpiration (Wasserabgabe der Pflanzen) durch die Erwärmung ansteigt, und wie viel dem erhöhten Pflanzenwachstum wegen der ertragssteigernden Wirkung erhöhter CO<sub>2</sub>-Konzentrationen anzurechnen ist.

### **Wasserwirtschaft und Rheinschifffahrt:**

In der wasserwirtschaftlichen Planung und im Management der Wasserressourcen müssen die zusätzlichen Unsicherheiten durch die Auswirkungen der Klimaänderung berücksichtigt werden.

Die Rheinschifffahrt bis Basel, die eine wichtige und kostengünstige Transportachse für die Schweiz ist, könnte wegen ausgeprägteren Niederwassers im Sommer und Herbst und wegen hohen Wasserstandes im Winter und Frühjahr öfters behindert werden.

## **2.2. Auswirkungen der Klimaänderung auf Ökosysteme**

**Die Wirkung der Klimaänderung auf Ökosysteme ist regional unterschiedlich und erfolgt im Zusammenspiel mit anderen Umwelteinflüssen. Die Artenzusammensetzung der natürlichen Ökosysteme wird sich verändern. In der Landwirtschaft wird die ertragssteigernde Wirkung erhöhter CO<sub>2</sub>-Konzentrationen und wärmerer Temperaturen durch andere Faktoren begrenzt.**

Ökosysteme sind für das heutige menschliche Leben sehr wichtig. Von bekannter Bedeutung sind die Agrar- und Waldökosysteme. Doch fast alle anderen Ökosysteme, z.B. Feuchtgebiete oder Seen, erfüllen ebenfalls wichtige Funktionen im Stoffhaushalt der Natur. Ohne die vielen Güter und Leistungen von Ökosystemen könnten wir nicht existieren oder wären gezwungen, sie mit kostspieligen Aufwendungen notdürftig zu ersetzen.

Ökosysteme reagieren empfindlich auf Umweltveränderungen und passen ihre Funktionen an die veränderten Bedingungen an. Die Klimaänderung ist aber lediglich einer von vielen Einflussfaktoren. Andere ergeben sich beispielsweise durch die steigende Nachfrage nach Gütern, die Zerstückelung der Landschaft oder den Eintrag von Schadstoffen. Diese Einflüsse gefährden einige Ökosysteme, fördern andere oder verändern ihre Funktion. Wegen der starken Verknüpfung mit unserer Wirtschaft werden grosse sozio-ökonomische Auswirkungen dieser Veränderungen vorausgesagt.

In vielen Fällen ist es schwierig, die Ursache von Veränderungen in Ökosystemen zu finden und die Bedeutung der Klimaänderung zu quantifizieren. Gerade in der Schweiz gibt es kaum unbeeinflusste Landökosysteme. Die grossen Veränderungen in der Landnutzung haben zum Beispiel die Artenvielfalt im Mittelland bereits stark verändert, weshalb der Einfluss der Klimaänderung der letzten Jahrzehnte kaum feststellbar ist. Die Wirkung der Klimaänderung auf Ökosysteme ist zudem regional unterschiedlich.

### **Änderungen in Feuchtgebieten, Seen und in den Alpen:**

Feuchtgebiete werden von der Klimaänderung in erster Linie über Veränderungen des Wasserhaushaltes beeinflusst. Der direkte Einfluss der Temperaturveränderung

ist weniger wichtig. Als Folge der Klimaänderung werden in den meisten Feuchtgebieten ein niedrigerer Wasserstand oder längere Trockenperioden erwartet.

Seen können je nach Art und Grösse besonders empfindlich auf Klimaänderungen reagieren. Zu den möglichen Folgen gehören die Erwärmung des Wassers, die Abnahme der Eisbedeckung, die Abnahme des Sauerstoffgehalts des Tiefenwassers und die erhöhte Nährstoff- und Sedimentzufuhr aus dem Einzugsgebiet. Auf der Nordhalbkugel sind die Seen heute durchschnittlich fast 20 Tage weniger lang eisbedeckt als Mitte des 19. Jahrhunderts. Dies hat u.a. Auswirkungen auf die biogeochemischen Kreisläufe, den Sauerstoffgehalt und damit auf das Angebot an Lebensräumen für Fische. In den Binnengewässern sind Kaltwasserfische heute weniger häufig als vor 30 Jahren.

Prognosen, wie die Klimaänderung die Nährstoffverhältnisse in Seen verändern wird, sind oft widersprüchlich. In Seen der gemässigten Zone könnte die Klimaerwärmung den Austausch zwischen Oberflächenschicht und Tiefenwasser verkleinern. Dies würde vor allem in kleinen Seen vermehrt zu Überdüngung führen.

In den Ökosystemen der Alpen haben menschliche Einflüsse wie die vermehrte Nutzung durch Landwirtschaft und Tourismus sowie erhöhte Stickstoffeinträge zum Teil Auswirkungen von ähnlicher oder gar grösserer Bedeutung als diejenigen einer Klimaänderung.

### **Land- und forstwirtschaftliche Produktion ändert sich:**

Sofern alle Bodennährstoffe ausreichend vorhanden sind, erhöht eine Zunahme der atmosphärischen CO<sub>2</sub>-Konzentration, zusammen mit wärmeren Temperaturen und erhöhten Niederschlägen, den Ertrag vieler landwirtschaftlicher Kulturpflanzen. In kühleren Regionen verlängert sich zudem die Vegetationsperiode. In trockenen Gebieten ergibt sich eine fördernde Wirkung aus der verbesserten Ausnutzung des verfügbaren Wassers durch die Pflanzen.

Diese positive Wirkung kann durch andere Faktoren wieder eingeschränkt werden: Die gleichzeitige Einwirkung von Luftschadstoffen (z.B. Ozon) und zunehmender UV-B-Strahlung oder Veränderungen im Nährstoff- und Wasserhaushalt der Agrarökosysteme dürften die Ertragssteigerungen begrenzen oder in selteneren Fällen gar in ihr Gegenteil umkehren. In einem wärmeren Klima steigen das Risiko für verschiedene Pflanzenkrankheiten und der Konkurrenzdruck durch Unkräuter in Ackerkulturen. Wärmeliebende Arten könnten sich ausbreiten, beispielsweise Gräser subtropischen Ursprungs mit geringerem Nährwert für Tiere, oder vermehrt holzige Pflanzenarten. Eine Zunahme des Kohlenstoff-Stickstoff-Verhältnisses der Pflanzen, verbunden mit einer Abnahme des Proteingehalts, steigert den Insektenbefall. Eine Zunahme der Windgeschwindigkeit und der Niederschlagsintensität fördert die Bodenerosion und damit den Verlust von Nährstoffen und senkt die Bodenfruchtbarkeit.

Auch die Qualität der landwirtschaftlichen Produkte ist von der Klimaänderung und der Zunahme der atmosphärischen CO<sub>2</sub>-Konzentration betroffen. Beispielsweise sinkt der Proteingehalt von Weizen, wodurch sich die Backqualität von Weizenmehl verschlechtert. Ebenso sinkt die Futterqualität von Wiesen, weshalb die Wiederkäuer mehr Methan, ein Treibhausgas, produzieren.

### **Ökonomische Auswirkungen in Land- und Forstwirtschaft:**

Ökonomisch wird die Landwirtschaft der Industrienationen weniger betroffen sein als diejenige von Entwicklungsländern, da die Industrieländer eher über die Mittel für die erforderlichen Anpassungen verfügen. Die Reaktion der Weltmarktpreise auf eine Klimaänderung lässt sich noch kaum abschätzen. Tendenziell wird erwartet, dass eine Zunahme der Temperatur um mehr als 2.5°C einen Preisanstieg bewirken würde, was sich positiv auf die Schweizer Inlandproduktion auswirken könnte.

Zu den möglichen Anpassungsstrategien der Holzwirtschaft gehören Intensivierung und Extensivierung, Zwangsnutzungen sowie die Anpflanzung neuer, klimatisch geeigneter Baumarten. In einem Gebirgsland wie der Schweiz dürfte die damit verbundene Kostenfrage im Vordergrund stehen. Gemäss neueren Holzmarktstudien wird das globale Holzangebot durch die Klimaänderung zunehmen. Dies würde zu sinkenden Holzpreisen führen, was sich positiv für die Konsumenten, unter den jetzigen forstökonomischen Bedingungen aber negativ für die Holzproduzenten auswirken dürfte.

### **Die Artenzusammensetzung ändert sich:**

Die Klimaänderung führt zu einer Verschiebung geeigneter Lebensräume einzelner Arten. Eine Verschiebung ganzer Ökosysteme in klimatisch günstigere Gebiete wird wegen der unterschiedlichen Toleranz der einzelnen Arten gegenüber veränderten Bedingungen nicht erwartet. Vielmehr ist mit einer Veränderung der Artenzusammensetzung am ursprünglichen Standort wegen neuer Konkurrenzverhältnisse zu rechnen.

Wegen der Klimaänderung werden auf Wiesen und Weiden andere Arten dominieren als bisher. Ähnliches gilt für die Artenzusammensetzung der Wälder. Beispielsweise könnten Laubbäume natürlich wachsende Nadelbäume verdrängen. Verschiebungen in der Zusammensetzung und Struktur von Wäldern verlaufen langsam und nicht linear mit dem Temperaturanstieg. Im Gebirge wird die potentiell durch Bäume besiedelbare Fläche grösser, da die klimatische Baumgrenze steigen wird.

Struktur und Artenzusammensetzung von Feuchtgebieten verändern sich hauptsächlich durch die unterschiedliche Fähigkeit der Arten, sich an trockenere Verhältnisse anzupassen. Es ist auch damit zu rechnen, dass auf mehr feuchten Standorten infolge Austrocknung neu Bäume einwachsen werden. Die lokale Artenvielfalt nimmt dadurch nicht unbedingt ab, wohl aber die landschaftliche Vielfalt.

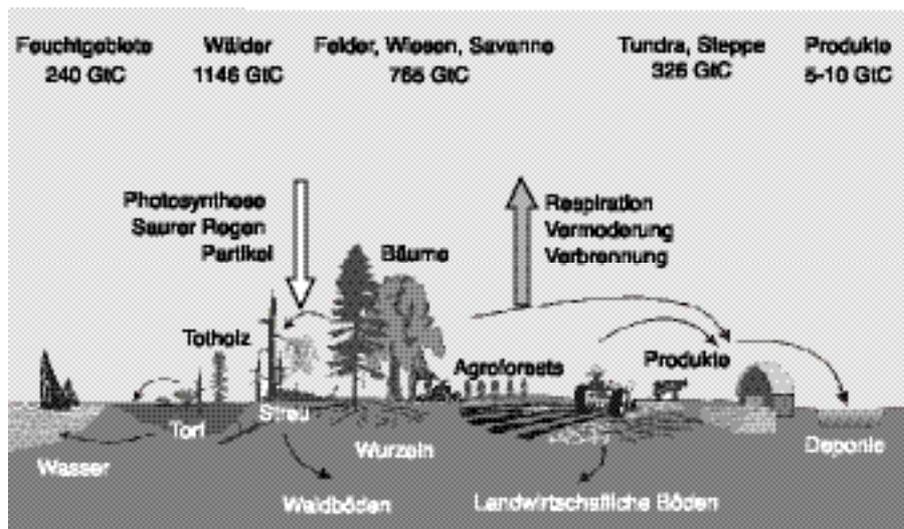
### **Tiere und Pflanzen weichen in die Höhe aus:**

Für die Tierwelt ist das Klima ein wichtiger Regulierungsfaktor. Zusammen mit anderen Einflussfaktoren wie der Nutzung, Verschmutzung und Zerstückelung von Lebensräumen sowie der Ausbreitung exotischer Arten beeinflussen Temperatur und Niederschlag das Ausbreitungsgebiet der Tierarten, die Verteilung geeigneter Lebensräume innerhalb des Ausbreitungsgebiets und die Struktur der Artengemeinschaften. Viele Studien deuten darauf hin, dass die Schnelligkeit der schon beobachtbaren Klimaänderung für Vögel und Wildtiere einen zusätzlichen Stressfaktor darstellt. Bei vielen Arten liessen sich bereits Veränderungen als Folge der bisherigen Klimaänderung nachweisen, z.B. eine Verschiebung des Ausbreitungsgebiets in höhere Breiten und in höher gelegene Regionen oder eine Verschiebung der Brutzeiten. In Europa wird eine Verschiebung des Ausbreitungsgebiets von Schmetterlingen und Vögeln beobachtet.

In den Alpen wird die räumliche Verschiebung einzelner Arten als Anpassung an die Klimaänderung nicht nur durch natürliche Barrieren wie etwa Bergkämme behindert, sondern vermehrt auch durch die Zerstückelung der Landschaft. Innerhalb eines Tales können sich einzelne Arten kleinräumig durch Ausweichen in die Höhe an eine Klimaänderung anpassen. Insgesamt wird die Klimaänderung die Zerstückelung und den Verlust an Lebensräumen vor allem in den Alpengebieten wahrscheinlich beschleunigen. Für das Überleben besonders empfindlich reagierender Arten könnte die Schaffung von naturbelassenen Verbindungsgebieten zwischen verschiedenen Höhenstufen entscheidend sein. Es ist jedoch zu befürchten, dass mehrere alpine Arten nur begrenzt ausweichen können, so unter anderem die heutigen Gipfelbewohner.

### Verminderte Schutzfunktion der Ökosysteme:

Als Folge der Klimaänderung wird der Rückgang der Gletscher und des Permafrosts in den Bergen anhalten. Der Rückgang des Permafrosts in den Alpen wird zu einer Abnahme der Hangstabilität und einer Zunahme der Häufigkeit und des Ausmasses von Steinschlag und Murgängen führen. Infolge der Klimaänderung könnte in dafür anfälligen Gebieten (in der Schweiz Tessin und Wallis) die Waldbrandgefahr zunehmen. Inwiefern die Schutzfunktion der Bannwälder in den Bergregionen vollständig aufrechterhalten bleibt, falls starke Änderungen in der Artenzusammensetzung von Gebirgswäldern auftreten, ist zurzeit noch unklar.



**Abbildung 9:** Landökosysteme als Motor des globalen Kohlenstoffkreislaufes: Durch Photosynthese entnehmen die Pflanzen CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre (weisser Pfeil) und binden den Kohlenstoff in organischem pflanzlichem Material ein. Pflanzen und Tiere setzen diesen durch die lebensnotwendige Veratmung oder Respiration (grauer Pfeil) wieder frei. Kohlenstoffvorräte der Atmosphäre und der Ökosysteme in GtC.

## 2.3. Veränderung des CO<sub>2</sub>-Senkenpotentials

**In Landökosystemen sind grosse Mengen Kohlenstoff gespeichert. Wegen der Klimaänderung ist kurzfristig mit einer Zunahme der Senkenwirkung zu rechnen. Über längere Zeiträume können sich die Ökosysteme aber auch wieder in Kohlenstoffquellen verwandeln.**

### Kohlenstoffsinken:

Ein Ökosystem, das mehr CO<sub>2</sub> aufnimmt, als es an die Luft abgibt, wird als Kohlenstoffsenke bezeichnet. Eines, das mehr CO<sub>2</sub> verliert, als es aufnimmt, ist eine Kohlenstoffquelle. Durch menschliche Aktivitäten, insbesondere durch Veränderungen in der Landnutzung, bei denen ursprüngliche Waldgebiete in landwirtschaftliche Nutzflächen umgewandelt werden, wird der Kohlenstoffspeicher der Landökosysteme global verändert. Die CO<sub>2</sub>-Bilanz eines natürlichen Ökosystems im Gleichgewicht ist ungefähr ausgeglichen.

Landökosysteme sind bedeutende Kohlenstoffspeicher und unter günstigen Bedingungen Kohlenstoffsinken. Insbesondere Wälder und Feuchtgebiete speichern sehr grosse Mengen an Kohlenstoff. In Landökosystemen sind ungefähr 2500

GtC gespeichert, davon rund 500 GtC in der Vegetation und 2000 GtC in den Böden. Die Erdatmosphäre enthält derzeit rund 760 GtC in der Form von CO<sub>2</sub> (Abbildung 9). Da die Landökosysteme viel Kohlenstoff enthalten und zudem jährlich riesige Mengen umsetzen, führt dies zu Rückkopplungseffekten, die sich auf den CO<sub>2</sub>-Gehalt der Atmosphäre auswirken. Die genaue Auswirkung der Temperaturerhöhung auf die CO<sub>2</sub>-Bilanz von Wäldern und Feuchtgebieten ist jedoch noch nicht genügend geklärt, da gleichzeitig gegenläufige Prozesse wirken, zum Beispiel eine erhöhte Produktivität bei gleichzeitig erhöhter Bodenatmung.

### **Grünlandböden:**

Unter günstigen Voraussetzungen stellen Grünlandböden eine Kohlenstoffsенke dar. In kühlen Regionen und höheren Lagen ist der Kohlenstoffvorrat des Bodens besonders gross. Im Falle einer Temperaturzunahme wird der Abbau der organischen Substanz im Boden jedoch beschleunigt. Dadurch sinkt der Kohlenstoffvorrat und die Ertragsfähigkeit der Böden nimmt langfristig ab.

### **Wald:**

Der Gesamteffekt einer Temperaturerhöhung auf die CO<sub>2</sub>-Bilanz der Wälder wird nur ungenügend verstanden, da Felduntersuchungen an ausgewachsenen Bäumen sehr kostspielig und technisch schwierig durchzuführen sind. Begasungsexperimente zeigen nach einigen Jahren eine Abnahme der Kohlenstoffaufnahme von Waldbeständen bei erhöhten atmosphärischen CO<sub>2</sub>-Konzentrationen. Verschiedene Effekte wie eine erhöhte Wachstumsrate oder eine höhere Streuproduktion klingen mit der Zeit ab. Diese Resultate werden durch andere experimentelle Untersuchungen aber nur zum Teil bestätigt.

Die grossräumigen Untersuchungen am globalen Kohlenstoffkreislauf sprechen hingegen eine deutliche Sprache: In mittleren Breiten, in denen sich auch die Schweiz befindet, sind die Wälder insgesamt zurzeit starke Kohlenstoffsенken, und das erst noch mit wachsendem Trend (1990er Jahre 2.3 GtC). Sie vermögen sogar die grossen Mengen an Kohlenstoff, die infolge Rodungen in den 1990er Jahren in den Tropen freigesetzt wurden (1.6 GtC), zu kompensieren. Als mögliche Ursache für die grosse Senkenwirkung gilt hauptsächlich die im letzten Jahrhundert stetig zurückgegangene Nutzung; aber auch Düngungseffekte durch die um 30% angestiegenen atmosphärischen CO<sub>2</sub>-Konzentrationen, menschverursachte, luftverfrachtete Stickstoff-Ablagerungen und klimatische Effekte könnten mitverantwortlich sein.

### **Feuchtgebiete:**

Die Auswirkung der Klimaänderung auf die Treibhausgas-Bilanz von Feuchtgebieten, die in nördlichen Breitengraden riesige Kohlenstoffvorräte in Form von Torf speichern, ist ebenfalls unklar. Wärmere und trockenere Verhältnisse reduzieren infolge tieferen Wasserstandes die Emissionen von Methan, beschleunigen aber den Torfabbau (CO<sub>2</sub>-Freisetzung). Gleichzeitig kann jedoch CO<sub>2</sub> durch zunehmende Bewaldung wieder vermehrt gebunden werden. An weiterhin nassen Standorten können höhere Temperaturen und höhere atmosphärische CO<sub>2</sub>-Konzentrationen die Methanemissionen erhöhen. Die mit der landwirtschaftlichen Nutzung verbundene Entwässerung führt zum Torfabbau und verwandelt Moore in CO<sub>2</sub>-Quellen und (teilweise) Lachgas-Quellen. Dieser Effekt wird bezüglich Treibhauswirksamkeit nicht durch die reduzierten Methanemissionen kompensiert.

## 2.4. Gesundheit

**Die Klimaänderung wird sich auf die Gesundheit der Bevölkerung auswirken. Wärmere Sommer und häufigere Hitzewellen führen in gemässigten Klimazonen zu mehr Todesfällen. Bekannte gesundheitliche Auswirkungen der Luftverschmutzung werden durch die Klimaänderung wahrscheinlich noch verstärkt. Zudem verändern sich Verbreitung und Häufigkeit von Infektionskrankheiten.**

Die unerwünschten Auswirkungen der Klimaänderung auf die Gesundheit werden voraussichtlich die erwünschten insgesamt überwiegen und in tropischen und subtropischen Ländern am ausgeprägtesten sein. Aber auch in Europa (und der Schweiz) wird die Klimaänderung die Gesundheit der Bevölkerung beeinträchtigen. Abwehrstrategien im Bereich der öffentlichen Gesundheit könnten die Auswirkungen mildern.

### Mögliche Abnahme der Gesamtsterblichkeit:

Untersuchungen in Europa haben gezeigt, dass bei einer Erhöhung der Sommertemperaturen die Gesamtsterblichkeit zunimmt. Mehrere Studien dokumentieren eine Zunahme der Sterblichkeit während Hitzewellen. Dabei sind die meisten Todesfälle auf Herz-Kreislauf-, Hirngefäss- und Atemwegserkrankungen zurückzuführen. Am stärksten betroffen sind ältere Personen sowie die städtische Bevölkerung. Mildere Wintermonate und weniger Kältewellen lassen vor allem in gemässigten Klimazonen eine Abnahme der Sterblichkeit erwarten. Insgesamt ist in gemässigten Klimaregionen wie der Schweiz wegen der Abnahme der Todesfälle durch Herz-Kreislaufkrankungen im Winter eine Abnahme der Gesamtsterblichkeit möglich. Über längere Zeit ist eine Anpassung der Bevölkerung an höhere mittlere Temperaturen möglich.

### Mehr gesundheitsschädigende Luftschadstoffe:

Mehr heisse Tage führen zu einer Zunahme der Emissionen von flüchtigen Kohlenwasserstoffen und zu vermehrter Bildung von Sekundärschadstoffen wie bodennahem Ozon. Für Europa wird eine Zunahme der Grundbelastung von bodennahem Ozon vorausgesagt. Es gibt Hinweise darauf, dass hohe Temperaturen die bekannten gesundheitsschädigenden Wirkungen des Ozons und anderer Luftschadstoffe auf den Menschen verstärken.

Temperaturinversionen, welche in der Schweiz häufig im Winter auftreten und oft mit Hochnebel verbunden sind, führen zu erhöhten Schadstoffkonzentrationen im Unterland und folglich zu gesundheitlichen Schäden. Wie die Klimaänderung solche Inversionslagen beeinflusst, ist allerdings schwierig vorherzusagen.

Die Klimaänderung wird wahrscheinlich auch in der Schweiz das jahreszeitliche Auftreten von durch Pollen ausgelösten Krankheiten, wie beispielsweise Heuschnupfen, verschieben. Aber auch Quellen von Innenraum-Allergenen, wie Milben, Schimmelpilze und Küchenschaben, sind klimaempfindlich und ihr zeitliches Auftreten könnte sich verändern.

### Leicht erhöhtes Risiko von Infektionskrankheiten:

Insekten und Zecken können Überträger von Infektionskrankheiten sein. Das Klima beeinflusst ihre Verteilung und Populationsdichte sowie ihre Entwicklung, aber auch das Vorkommen von Wirtspflanzen und Wirtstieren. Die Klimaänderung könnte die Dauer der Übertragungssaison von Zecken verlängern sowie deren Verbreitung in höhere Lagen und nördlichere Breitengrade erleichtern. Fliegen, Schaben und Nagetiere können Träger von Krankheiten sein, die über Nahrungs-

mittel unter den Menschen verbreitet werden. Durch die Klimaänderung könnten ihre Verteilung und Aktivität beeinflusst werden. Wärmeres Klima zusammen mit nicht angemessener Nahrungsmittelverarbeitung und -aufbewahrung könnte zu einer Zunahme nahrungsmittelbedingter Infektionen führen.

In Osteuropa, wo die Verschlechterung des Gesundheitssystems bereits zum erneuten Auftreten von Malaria geführt hat, könnte die Klimaänderung das Malariarisiko weiter erhöhen. Ebenso könnte sich in südlichen Regionen Europas das aktuelle, kleine Malariarisiko erhöhen. In der Schweiz, wie im restlichen Nord- und Westeuropa, machen die existierenden Strukturen des Gesundheitswesens sowie das Fehlen geeigneter Brutgebiete ein lokales Wiederauftreten von Malaria unwahrscheinlich. Mit der Zunahme internationaler Reisen wird aber in allen europäischen Ländern eine stetige Zunahme von importierten Malariafällen beobachtet.

### Gesundheitliches Potential der Klimapolitik

Die Klimaänderung wirkt sich langfristig auf die Gesundheit aus. Klimapolitik kann aber sofortige gesundheitliche Vorteile bringen, da Treibhausgasemissionen eng mit der lokalen Luftverschmutzung zusammenhängen.

Verbrennungsprozesse in Industrie und Verkehr sind die wichtigsten CO<sub>2</sub>-Quellen der Schweiz. Sie belasten gleichzeitig die Luft mit Schadstoffen wie Stickoxiden, Feinstäuben, Kohlenmonoxid und im Sommer mit Ozon. Diese Luftverschmutzung verursacht Atemwegs- und Herz-Kreislaufkrankungen. An Tagen mit höheren Schadstoffbelastungen steigen die Sterberaten in der Schweiz, und Spitaleinweisungen, Arztbesuche und Absenzen am Arbeitsplatz nehmen zu. Im grossen Schweizer Forschungsprojekt SAPALDIA wurde nachgewiesen, dass die Lungenfunktion schlechter wird, je höher die langfristige Schadstoffbelastung am Wohnort ist. Menschen mit schlechter Lungenfunktion haben eine tiefere Lebenserwartung.

Klimapolitische Massnahmen, welche sowohl CO<sub>2</sub> als auch die übrigen Schadstoffe aus der Verbrennung fossiler Brennstoffe reduzieren, sind aus gesundheitspolitischer Sicht besonders attraktiv. Dies sind beispielsweise Tempolimiten, Förderung von Fahrzeugen mit niedrigem Energieverbrauch und emissionsfreie Motortechnologien sowie die Umlagerung des Schwerverkehrs von der Strasse auf die Schiene. Höhere Preise für Benzin und Diesel können indirekt die Verbreitung verbrauchsarmer Fahrzeuge fördern. Während der direkte Nutzen der Klimapolitik von langfristiger und globaler Natur sein wird, bewirkt die Verbesserung der Luftqualität bereits kurzfristig und lokal in der Schweiz eine Abnahme der gesundheitlichen Schäden.

Das gesundheitliche Potential der Klimapolitik hängt von den ergriffenen Massnahmen ab. Regelungen, welche ausschliesslich die Reduktion von CO<sub>2</sub>-Emissionen bezwecken, bringen unter Umständen keinen gesundheitlichen Nutzen oder könnten sogar zu zusätzlichen Schäden führen. Beispielsweise produzieren Dieselfahrzeuge zwar etwas weniger CO<sub>2</sub> als Benzinmotoren. Mit der heutigen Technologie stossen sie aber weiterhin mehr gesundheitlich relevante Feinstäube und potentiell krebserregende Stoffe aus. Ähnliche Widersprüche könnten sich durch die Isolation von Bauten zur Verbesserung der Energieeffizienz ergeben, falls durch die verminderte Frischluftzufuhr eine Zunahme gesundheitsschädigender Stoffe in den Innenräumen erfolgt.

Es ist wichtig, klimapolitische Massnahmen im Gesamtzusammenhang zu beurteilen. Eine integrative nachhaltige Verkehrspolitik birgt das grösste Potential für die gleichzeitige Erfüllung der Ziele einer nachhaltigen Klima- und Gesundheitspolitik. So bringt die Kombination der verkehrspolitischen Massnahmen wie Förderung des öffentlichen und kombinierten Verkehrs, Raumplanung, Temporeduktion, intelligente Verkehrsleitsysteme und gezielte Förderung von Velofahrern und Fussgängern nicht nur klimapolitischen Nutzen, sondern optimiert gleichzeitig den Nutzen für die Gesundheit. Vor diesem Hintergrund kommt umfassenden Strategien wie beispielsweise dem Schweizerischen Aktionsplan Umwelt und Gesundheit hohe Bedeutung zu.

*PD Dr. med. et PhD Nino Künzli*

Im südlichen Europa könnte das Dengue-Fieber wieder auftreten, da die Verbreitung des Überträgers, einer Mückenart, durch die Klimaänderung erleichtert würde. Das Infektionsrisiko für Leishmaniose könnte für Mensch und Hund zunehmen, wenn der Überträger, eine Sandfliege, sich durch die Klimaänderung vom Mittelmeerraum her weiter nach Norden ausbreitet.

### Reduktion fossiler Brennstoffe nützt der Gesundheit:

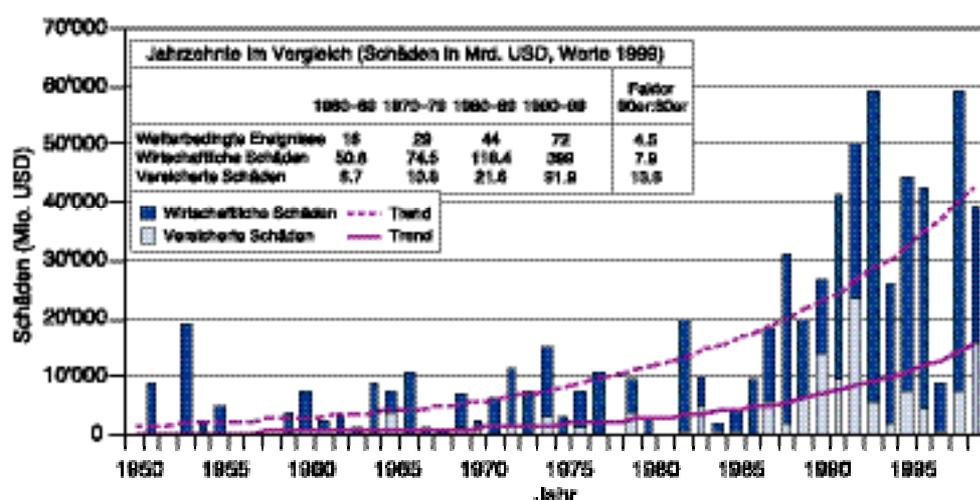
Bei der Verbrennung fossiler Brennstoffe entstehen gesundheitsschädigende Luftschadstoffe, ozonschädigende Substanzen und klimawirksame Treibhausgase. Eine Reduktion der Verbrennung fossiler Brennstoffe zugunsten des globalen Klimas bringt daher so genannt sekundäre Nutzen, da gleichzeitig die Ozonschicht und die Gesundheit der Bevölkerung profitieren. Eine weltweite Reduktion der Feinstaubkonzentrationen in der Aussenluft gemäss dem Kyoto-Protokoll würde im Vergleich zu einem *Business-as-usual*-Szenario (Entwicklung geht unverändert weiter) bis 2020 weltweit 700'000 vorzeitige Todesfälle pro Jahr verhindern. Durch den Ersatz fossiler Energieträger durch erneuerbare Energien, insbesondere Wind- und Solarenergie, könnten gleichzeitig die Treibhausgasemissionen reduziert und der Gewinn für die Gesundheit der Bevölkerung maximiert werden.

## 2.5. Versicherungswesen und Finanzsektor

**Die volkswirtschaftlichen und versicherten Schäden durch wetterbedingte Naturkatastrophen haben global stark zugenommen. Im Finanzsektor sind vor allem die Versicherungen betroffen. Für das erhöhte Schadenpotential sind primär Bevölkerungs- und Wirtschaftswachstum, Besiedlung von Risikogebieten sowie lokale Umweltfaktoren verantwortlich. Ein klarer Zusammenhang zwischen wachsenden Schäden und Klimaänderung lässt sich noch nicht herstellen.**

### Volkswirtschaftliche und versicherte Schäden sind stark angestiegen:

Seit den 1960er Jahren sind die jährlichen volkswirtschaftlichen Schäden aus Naturkatastrophen real um einen Faktor 7.9 und die versicherten Schäden um einen Faktor 13.6 angestiegen (Abbildung 10). Weltweit beliefen sich die wetterbeding-



**Abbildung 10:** Gesamtwirtschaftliche und versicherte Verluste. Seit den 1960er Jahren sind die jährlichen gesamtwirtschaftlichen Verluste aus Naturkatastrophen real um einen Faktor 7.9 und die versicherten Verluste um einen Faktor 13.6 angestiegen.

## **Klimaänderung und Entwicklungsländer: Eine zusätzliche Herausforderung**

Die zukünftigen *Auswirkungen der Klimaänderung auf Entwicklungsländer* sind auf beängstigende Weise absehbar, auch wenn sie vor dem Hintergrund der rasant ablaufenden sozioökonomischen und ökologischen Veränderungen und der daraus resultierenden immensen Probleme eine nur untergeordnete Rolle spielen mögen. Probleme ergeben sich vor allem deshalb, weil dieser Teil der Erdbevölkerung nur wenig Möglichkeiten zur Anpassung hat und folglich am verwundbarsten ist.

*Einfluss der Entwicklungsländer auf das Klima:* Die Mitverantwortung der Entwicklungs- und der Schwellenländer für die globalen Klimaänderungen steht heute ausser Zweifel, auch wenn diese Länder gemäss Kyoto-Protokoll in der ersten Verpflichtungsperiode noch nicht zu den Verminderungsstrategien beitragen müssen. Wegen des starken Bevölkerungswachstums und des steigenden pro-Kopf-Verbrauchs an fossilen Energieträgern wird diese Verantwortung noch zunehmen. Hinzu kommen massive Landnutzungsänderungen mit damit gekoppeltem CO<sub>2</sub>-Ausstoss. Der globale netto CO<sub>2</sub>-Ausstoss durch veränderte Landnutzung wird zwischen 1980 und 1990 auf 1.7 Gt C/Jahr geschätzt und entspricht etwa 1/4 der Emissionen durch die Nutzung fossiler Energien. Er stammt fast ausschliesslich von der Abholzung tropischer Feucht- und Trockenwälder, bei denen es sich im Prinzip um regenerierbare Ressourcen handelt. Die grossflächige Abholzung von Wäldern in den Tropen verringert zudem den Wasserkreislauf und die Niederschläge in der Region und beeinflusst möglicherweise das globale Klima. Meist sind die Landnutzungsänderungen verbunden mit einem Verlust an Biodiversität und mit einer drastischen Abnahme des Humusgehaltes im Boden. Die Auswirkungen reichen daher weit über die Frage der Klimaänderung hinaus.

*Rolle der Entwicklungsländer bei der Stabilisierung:* Der Einbezug der Kohlenstoffsenken im Kyoto-Protokoll im Rahmen des „Clean Development Mechanism“ beinhaltet auch Opportunitäten für Entwicklungsländer, vor allem in Bezug auf Transferleistungen der industrialisierten Staaten. Industrieländer werden aber nicht umhin kommen, die Verbrennung ihrer fossilen Energieträger möglichst rasch mit nachhaltigeren Systemen zu substituieren. Nur so werden sich die Entwicklungsländer motivieren lassen, diese ebenfalls zu adoptieren.

*Verantwortung der Industrienationen:* Die Probleme der Entwicklungsländer betreffen indirekt auch die Industriestaaten. Einerseits sind sie verpflichtet, den Entwicklungsländern in Notsituationen zu helfen. Andererseits könnte der Einwanderungsdruck aus den Krisengebieten zunehmen. Unter anderem muss in den betroffenen Regionen das Verständnis und Bewusstsein für die Veränderungen und die notwendigen Verhaltensänderungen gefördert werden. Ohne landeseigene Kompetenz und Kooperation mit der ländlichen Bevölkerung werden aber deren Anpassungs- und Vermeidungsanstrengungen kaum greifen. Darum ist auch eine umfassende, integrale Forschungszusammenarbeit in Partnerschaft mit Entwicklungsländern unumgänglich, deren Finanzierung vor allem die Industrieländer werden leisten müssen.

*Prof. Hans Hurni*

ten Schäden zwischen 1985 und 1999 auf 707 Mrd. USD. Nur ein Bruchteil dieser Summe war versichert. Die Stürme Lothar und Martin von Dezember 1999 verursachten den Versicherungen Westeuropas – inklusive der Schweiz – Kosten von ungefähr 8.4 Mrd. USD und forderten 140 Todesopfer.

Die Zunahme der wetterbedingten Schäden hat verschiedene Ursachen. Sozioökonomische Trends (Bevölkerungs- und Wirtschaftswachstum; Besiedlung von Risikogebieten) und lokale Umweltfaktoren (Abholzung; Überbauung) sind primär verantwortlich für die Erhöhung des Schadenpotentials.

### **Überwälzen des Risikos auf die Kunden und den Staat:**

Eine Zunahme wetterbedingter Naturkatastrophen hätte spürbare Auswirkungen auf die Sach- und Rückversicherungsbranche. Trotz einer wahrscheinlichen Zunahme von Krankheits- und Todesfällen sind die Bereiche Lebens- und Krankenversicherung weniger stark von der Klimaänderung betroffen. Für das Bankenwesen sind die direkten Auswirkungen durch wetterbedingte Naturkatastrophen bei genügender Verteilung des Risikos wohl relativ gering.

Versicherungen reagieren auf höhere Schadenrisiken, indem sie ihre Prämien erhöhen, den Selbstbehalt der Kunden erhöhen, den Deckungsgrad heruntersetzen oder die Erneuerung von Policen verweigern. Das Risiko wird dadurch auf die Kunden und den Staat verlagert. Rückversicherungsprämien reagieren ähnlich auf erhöhtes Risiko. Dies erlaubt der Branche zwar, ein angemessenes Verhältnis zwischen Risiko und Ertrag zu bewahren, aber aus gesamtwirtschaftlicher Sicht ist eine solche Strategie ungenügend. Längerfristig muss die potentielle Reduktion des privatwirtschaftlichen Versicherungsschutzes als Signal verstanden werden, verstärkte Massnahmen zur Risikoverminderung zu ergreifen (z.B. revidierte Bauvorschriften) oder aber sich aus Risikogebieten zurückzuziehen.

### **Eine Herausforderung für die Entwicklungspolitik:**

Entwicklungsländer werden ungleich stärker von Naturkatastrophen betroffen als Industrieländer, und der Versicherungsschutz ist ungenügend. Obwohl zwischen 1985 und 1999 43% der volkswirtschaftlichen Schäden bedingt durch Naturkatastrophen arme Länder (Jahreseinkommen kleiner als 9360 USD.) betreffen, fliessen nur 8% der Versicherungszahlungen in diese Länder. In Afrika und Asien decken Versicherungen nur gerade 4 bis 7% der wetterbedingten Schäden, verglichen mit 27 bis 30% in Europa und den USA. Naturkatastrophen werfen den Entwicklungsprozess dieser Länder oft um Jahre oder gar Jahrzehnte zurück. Die Aussicht auf vermehrte Naturkatastrophen ist deshalb nicht zuletzt auch eine Herausforderung für die Entwicklungspolitik und die westlichen Entwicklungsorganisationen.

## **2.6. Siedlungsgebiete, Energieverbrauch und Tourismus**

**Der Einfluss der Klimaänderung auf den menschlichen Lebensraum dürfte in der Schweiz vorwiegend indirekt durch Einwanderung aus stark betroffenen Gebieten, Versorgungsunterbrüche und steigende Versicherungsprämien zu spüren sein. Die Entwicklung des Energieverbrauchs als Folge der Klimaänderung ist unsicher. Im Tourismussektor wird vor allem der Wintertourismus betroffen sein.**

### **Siedlungsgebiete sind indirekt betroffen:**

Im Vergleich zu Küstengebieten oder ariden und semiariden Regionen scheint die Schweiz wesentlich weniger durch direkte Folgen der Klimaänderung gefährdet zu sein. Ausnahmen sind häufigere Stürme, Überschwemmungen in den Flusstälern sowie Erdbeben in den Alpen und Voralpen wegen Starkniederschlägen und des Rückgangs des Permafrosts. Indirekte Auswirkungen der Klimaänderung könnten jedoch wesentlich gewichtiger sein. Beispielsweise könnte die Versorgung mit lebenswichtigen Gütern, wie Energieträger und Nahrungsmittel, vom Weltmarkt zeitweilig wegen Liefer- und Transportschwierigkeiten unterbrochen werden. Der Einwanderungsdruck aus stark betroffenen Gebieten könnte zunehmen, und der Kostendruck auf Eigentümer von Bauten könnte wegen der Schadenversicherungen steigen.

### **Unsichere Entwicklung des Energieverbrauchs:**

Die Klimaänderung wird Auswirkungen auf den Energieverbrauch haben. Der Bedarf an Heizenergie im Winter dürfte abnehmen, jener für die Kühlung im Sommer zunehmen. In den milden Wintern in Europa zwischen 1988 und 1990 ist der Energiebedarf um 2% gesunken. Gemäss einer Studie würde sich bei einem Temperaturanstieg von 4.5°C in Nordeuropa der Stromverbrauch für Kühlung im Sommer mehr als verdoppeln. Der Energiebedarf der Schweiz wird auch in Zukunft

durch die Gesamtheit der gesellschaftlichen Faktoren bestimmt. Die Auswirkungen einer Erwärmung auf den Energieverbrauch lassen sich nicht zuverlässig abschätzen.

### **Wintertourismus betroffen:**

Von der Klimaänderung wird auch der Wintertourismus betroffen sein. Gemäss einer Studie würde bei einem Temperaturanstieg von 3°C die Schneegrenze im Winter um 300 bis 400 m steigen, und es gäbe unter 1200 m keine kontinuierliche Schneebedeckung mehr. Wegen der kürzeren Saison würden der Bedarf an Kunstschnee und die Nachfrage nach einem Angebot an alternativen Aktivitäten steigen. Es ist anzunehmen, dass der Wintertourismus auf andere Destinationen ausweichen wird.

### **Wechselwirkungen zwischen Tourismus und Klimaänderungen**

Es ist hinlänglich bekannt, dass im Tourismus die natürlichen Faktoren wie Landschaft, Wasser, Schnee oder Wetter eine zentrale Bedeutung haben. Dies mag der hauptsächliche Grund dafür sein, dass im Zusammenhang mit der aktuellen Klimadiskussion der Tourismus oft als Betroffener klimarelevanter Prozesse dargestellt wird. Viele touristische Attraktionen und Aktivitäten sind tatsächlich stark von den bestehenden klimatischen Verhältnissen abhängig. Klimaänderungen wirken sich somit bedeutend rascher auf den Tourismus aus als auf das Alltagsleben. Dabei stehen folgende Aspekte im Vordergrund:

*Die steigende Schneefallgrenze:* Sie ist die in der Schweiz wohl am häufigsten diskutierte Konsequenz einer möglichen Klimaänderung. Anstatt 85% der heutigen Skigebiete könnten für die Zukunft nur noch rund 60% als schneesicher bezeichnet werden. Während der Wintertourismus in den zentralen Alpenregionen (Wallis, Graubünden) auch in einer wärmeren Zukunft nur geringfügig gefährdet ist, muss in den Voralpen mit einer Vielzahl von bedrohten Skigebieten gerechnet werden.

*Das Abschmelzen der Gletscher:* Die Gletscher würden im Alpenraum bei den prognostizierten Erwärmungen stark schmelzen. Damit verliert der Sommertourismus eine der wichtigsten Attraktivitäten. Kleinere, nicht sehr hoch gelegene Gletscher dürften ganz verschwinden, grössere stark schrumpfen.

*Das Auftauen der Permafrostböden:* Der Permafrost stabilisiert in steilen Berglagen Schutt und Geröll. Durch das Auftauen des Permafrosts steigt das Risiko von Steinschlag, Rutschungen und Murgängen. Da viele Fundamente von Masten und Stationen der Bergbahnen sowie von Lawinenverbauungen im gefrorenen Geröll verankert sind, steigt zudem die Notwendigkeit, die Fundamente kostspielig zu erneuern.

*Die Veränderung von Flora und Fauna:* Veränderungen in der Vegetation wirken sich auch auf das Landschaftsbild aus. Da einerseits das Landschaftsbild, die Flora und die Fauna sehr wichtige Angebotselemente sind, andererseits durch eine Beeinträchtigung der Schutzfunktion Ängste bei den Touristen geschürt werden, sind Auswirkungen auf den Tourismus zu erwarten.

*Das Ansteigen des Meeresspiegels:* Vom Anstieg des Meeresspiegels durch die wärmebedingte Volumenausweitung wäre insbesondere der Badetourismus betroffen. Überflutete Sandstrände würden vielerorts die hauptsächliche Attraktivität für Badeferien beeinträchtigen.

Diese nicht abschliessende Aufzählung zeigt, dass die Klimaänderungen die Grundlagen des Tourismus gefährden. Den Tourismus jedoch nur als betroffene Branche darzustellen, wäre zu einfach. Zwar ist die Datenlage zum Tourismus als Verursacher der Klimaänderung eher dünn, doch ist hinlänglich bekannt, dass Mobilität zentrale Voraussetzung des Tourismus ist. Untersuchungen belegen, dass der Anteil des freizeitmotivierten Verkehrs der Schweizer und Schweizerinnen rund 60% des gesamten Personenverkehrsvolumens ausmacht. Die hohen Wachstumsraten im Luftverkehr und die verstärkende Wirkung von Wasserstoff und Stickoxid in den grossen Höhenlagen führen dazu, dass der Luftverkehr zu einem zentralen Klimafaktor avanciert. Das geflügelte Wort der „Zerstörung des Tourismus durch den Tourismus“ hat eine neue Dimension erhalten.

*Prof. Hansruedi Müller*

---

## 3. Strategien zur Abschwächung der Klimaänderung

---

Im dritten Kapitel sind die für die Schweiz wichtigsten Aussagen der Arbeitsgruppe III des dritten Wissensstandsberichts (TAR) des IPCC zusammengefasst. Im Bericht der Arbeitsgruppe III werden auf über 700 Seiten die wissenschaftlichen, technischen, umweltrelevanten, wirtschaftlichen und sozialen Aspekte einer Abschwächung der Klimaänderung behandelt. Abschätzungen der Unsicherheiten werden keine gemacht.

Im Rahmen dieser Zusammenfassung werden die technischen und biologischen Möglichkeiten zur Reduktion der Treibhausgasemissionen, Hemmnisse und Marktunvollkommenheiten in der Umsetzung, politische Massnahmen und Instrumente sowie die Kosten einer Reduktion behandelt. Die Strategien zur Abschwächung der Klimaänderung umfassen lokale, nationale und internationale Massnahmen. Die Aussagen in diesem Kapitel sind vorwiegend allgemeiner Natur.

### 3.1. Technisches Potential zur Reduktion der Emissionen

**Das technische und ökonomische Potential zur Reduktion der Treibhausgasemissionen ist genügend gross, um die jährlichen, globalen Emissionen bis 2020 auf dem Emissionsniveau von 2000 zu stabilisieren. Fehlende ökonomische Anreize und ausbleibende politische Massnahmen erschweren oft seine Nutzung.**

In den SRES-Szenarien (vgl. Kapitel 1.4) spielt der technische Fortschritt eine entscheidende Rolle für die künftige Entwicklung der Treibhausgasemissionen. Möglichkeiten zur Reduktion der Treibhausgasemissionen in den nächsten 10 bis 20 Jahren bestehen zum Beispiel in folgenden Bereichen:

#### **Wohn- und Dienstleistungsgebäude:**

Möglichkeiten zur Emissionsreduktion bieten der Einsatz energieeffizienter Technologien bei Raumheizung und Klimatisierung, die integrale Gebäudeplanung, die Reduktion der *Stand-by*-Verluste von Geräten und Anlagen und die dezentrale Energieversorgung.

#### **Transport und Mobilität:**

Ein grosses Potential im Bereich Mobilität bieten neue Technologien wie Hybrid-Antriebe für Fahrzeuge in der Stadt, Brennstoffzellen und Biotreibstoffe. Zum Beispiel könnte durch kombinierte Anwendung neuer Technologien der Wirkungsgrad von Lastwagen um bis zu 60% verbessert werden. Billige Treibstoffe sowie steigendes Gewicht, steigende Motorleistung und sinkende Auslastung der PKWs wirken der Nutzung dieser Potentiale entgegen.

#### **Industrie:**

Die wichtigste Möglichkeit zur Reduktion der Treibhausgasemissionen ist die Steigerung der Energieeffizienz. Ein erhebliches Potential besteht in der Energiesubstitution durch emissionsarme und emissionsfreie Energieträger. Verbesserte Effizienz des Materials durch angepasstes Produktdesign sowie Recycling (Wiederverwertung von Material) und Kaskadennutzung (Wiederverwendung eines Produkts) sind weitere Möglichkeiten.

**Abfallbewirtschaftung:**

Möglichkeiten zur Reduktion der Treibhausgasemissionen in der Abfallwirtschaft bieten die Förderung des Recyclings, das Kompostieren und Vergären in Kleinanlagen sowie neue Technologien bei der Verbrennung. Reduktionsmassnahmen in der Abwasserbehandlung sind zum Beispiel die Reduktion der Abwassermengen, die Schlammbehandlung unter Sauerstoffausschluss und die Nutzung des entstehenden Klärgases (Methan) zur Wärme- und Stromgewinnung.

**Energieversorgung:**

Bei der Nutzung fossiler Energieträger für die Stromproduktion bestehen Reduktionspotentiale vor allem im Einsatz von Gas- und Dampfturbinen, Wärme-Kraft-Kopplungen und Brennstoffzellen. Dem vermehrten Einsatz der Kernenergie stehen Fragen der Wirtschaftlichkeit, das fehlende öffentliche Vertrauen in die Sicherheit der Anlagen sowie die ungelöste Langzeitlagerung der Abfälle im Weg. Bei den erneuerbaren Energien bleibt die Wasserelektrizität die Technologie, die am weitesten entwickelt ist. Bei der Nutzung von Biomasse ist die Technologie zur Vergasung nahe der Wirtschaftlichkeitsschwelle. Methanolgewinnung aus Holz ist der einzige wirtschaftliche Weg zur Herstellung flüssiger Biobrennstoffe. Die Nutzung der Sonnenenergie durch Photovoltaik ist nur in Nischenmärkten konkurrenzfähig. Investitionen in Grossanlagen sind nötig, um die Herstellungspreise zu senken.

**3.2. Reduktion der CO<sub>2</sub>-Konzentration durch Kohlenstoffsinken**

**Durch menschliche Aktivitäten wird die Kapazität globaler Kohlenstoffspeicher von Landökosystemen verändert. Massnahmen, die solche Speicher erhalten oder vergrössern, können kurz- bis mittelfristig zur Abschwächung der Klimaänderung beitragen. Der Ersatz fossiler Brennstoffe durch CO<sub>2</sub>-neutrale Biomasse reduziert die CO<sub>2</sub>-Emissionen.**

Durch die Umwandlung natürlicher Ökosysteme in landwirtschaftlich genutztes Land wurden bis heute rund 120 GtC in die Atmosphäre abgegeben. In Europa und den USA hat sich dieser Prozess mittlerweile umgekehrt, die Ökosysteme nehmen heute einige wenige Prozent des durch die Verbrennung von fossilen Brennstoffen ausgestossenen CO<sub>2</sub> auf und wirken so als so genannte Kohlenstoffsinken. Gründe für diese Umkehrung sind die Ausweitung der Waldgebiete in diesen beiden Regionen und der jährliche Holzzuwachs, der die Holzerntemengen übersteigt. In den Tropen hingegen wird heute durch Landnutzungsänderungen unter dem Strich CO<sub>2</sub> in die Atmosphäre abgegeben: in den 1990er Jahren waren es ungefähr 1.6 GtC pro Jahr, was etwa 20% der jährlichen globalen, vom Menschen verursachten Treibhausgasemissionen entspricht. (Vgl. Kapitel 2.3.)

**Drei mögliche biologische Massnahmen:**

Es gibt drei biologische Ansätze zur gezielten Reduktion des Anstiegs der CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Atmosphäre: Den Schutz existierender Kohlenstoffspeicher und die Vermeidung von CO<sub>2</sub>-Emissionen, die zusätzliche Einbindung von Kohlenstoff in Biomasse sowie die Substitution fossiler Brennstoffe oder energieintensiver Produkte durch (CO<sub>2</sub>-neutrale) Biomasse.

## Technisches Potential für die Treibhausgasreduktion in der Schweiz

Die in den letzten Jahren durchgeführten Analysen (z.B. die Programme „Energie 2000“ und „EnergieSchweiz“ des Bundesrates und die Studie „CH50%“ der Schweizerischen Akademie der Technischen Wissenschaften, SATW) ermöglichen eine fundierte Abschätzung des Potentials der Treibhausgasreduktionen in der Schweiz. Nachfrageseitige Massnahmen für das effizientere Erbringen von Energiedienstleistungen, die Steigerung der Effizienz entlang der Energieumwandlungsketten, die Substitution zwischen den fossilen Primärenergieträgern und der Einbezug erneuerbarer Primärenergien können dazu beitragen.

Im Bereich der Privathaushalte lässt sich der Bedarf an Raumwärme durch bauliche Massnahmen (Isolation, klimaangepasste Bauweise) drastisch senken. Der vermehrte Einsatz von Erdgas, Wärmepumpenheizungen und Fernwärme kann den CO<sub>2</sub>-Ausstoss progressiv verringern. Der Anteil der erneuerbaren Energien an der Wärmebereitstellung wurde im Rahmen von „Energie 2000“ um rund 2% gesteigert, wobei Holz und Biomasse aus KVA den weitaus wichtigsten Beitrag leisteten. Insgesamt wird, unter der Annahme steigender Energiepreise, eine Senkung des Verbrauches fossiler Energieträger bis 2040 auf deutlich weniger als 50% für möglich gehalten („CH50%“).

Für die Industrie stellte die Energie immer schon einen wichtigen Kostenfaktor dar. Kostengünstige Massnahmen wurden deshalb bereits ergriffen und das Reduktionspotential ist entsprechend geringer. Trotzdem sieht die SATW bei steigender realer Wertschöpfung eine Senkung der Treibhausgasemissionen vor allem durch Effizienzgewinne bei verschiedenen Prozessschritten um 20% bis 2020 als realistisch an. Im Bereich Gewerbe, Landwirtschaft und Dienstleistungen wurden in den letzten Jahren die Effizienzsteigerungen durch gesteigerten Energiebedarf kompensiert, welcher u.a. von höheren Komfortansprüchen und der zunehmenden Informatisierung herrührt. Im Bereich der Dienstleistungsgebäude sind bei der Raumwärme ähnliche Massnahmen möglich wie im privaten Sektor; die dezentrale Elektrizitätserzeugung mit Brennstoffzellen und Kraft-Wärme-Kopplung bietet hier ein grosses Potential. Zusätzlich existiert noch viel Raum für Innovation bei der Steigerung der Effizienz von Geräten. Insgesamt erscheint in diesem Sektor eine Halbierung des Verbrauches fossiler Energieträger bis 2020 als technisch möglich.

Der Verkehrssektor ist in der Schweiz für ca. 35% des Verbrauches an fossilen Energieträgern verantwortlich. Während beim Güterverkehr die Verbrauchsoptimierung schon immer einen ökonomischen Faktor darstellte und der Luftverkehr als schwer zu beeinflussen gilt, wird das grösste Potential für Treibhausgasreduktionen beim Personen-Landverkehr geortet. Nachfrageseitige Massnahmen, wie Änderungen in der Siedlungsstruktur oder im Freizeit-Mobilitätsverhalten, sind realistisch mit grossen Zeitkonstanten verknüpft. Die Änderung des Modalsplits durch partielle Umlagerung des Verkehrs von Personen- und Lastkraftwagen auf die Bahn kann den Treibstoffverbrauch signifikant senken. Den absolut und prozentual grössten Beitrag liefern technische Massnahmen innerhalb des Sektors des motorisierten Individualverkehrs. Innovationen am Fahrzeug (Leichtbauweise, Aerodynamik, Rollwiderstand) reduzieren den Bedarf an mechanischer Energie. Durch den Einsatz von Erdgasmotoren oder Dieselmotoren mit modernster Abgasentstickung und Partikelfiltertechnik lässt sich der CO<sub>2</sub>-Ausstoss im Vergleich zum äquivalenten Benzinmotor um ca. 15% senken.

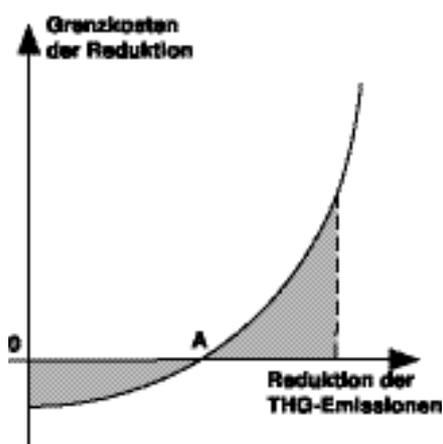
Änderungen in der Fahrzeugflotte erfolgen mit der Zeitskala einer durchschnittlichen Lebensdauer der Fahrzeuge. Einer drastischen Senkung des Verbrauches von Neufahrzeugen, verbunden mit der Realisierung von Niedrigstmissionskonzepten, kommt daher höchste Priorität zu. Längerfristig werden, besonders bei gleichzeitiger Einbindung von Treibstoffen aus erneuerbaren Energien, Brennstoffzellen attraktiv. Zusammenfassend kommt die Studie „CH50%“ zum Schluss, dass trotz der erwarteten absoluten Steigerung der Verkehrsnachfrage bis 2020 das technische Potential für eine Halbierung des fossilen Energieverbrauches im Verkehrssektor besteht.

*Prof. Alexander Wokaun*

### Wälder mit grossem Potential:

Von den Landökosystemen bietet der Forstsektor das grösste Potential zur Einbindung von Kohlenstoff und zur Vermeidung von CO<sub>2</sub>-Emissionen. Waldschutz und Aufforstungen können einen grossen Beitrag zum Klimaschutz leisten. Zudem könnte durch verbessertes Waldmanagement global bis 2010 eine Emissionsreduktion von 0.17 GtC pro Jahr und bis 2040 von 0.7 GtC pro Jahr erreicht werden. Dies würde bis 2010 ungefähr 3%, bis 2040 etwa 12% der globalen, vom Menschen dannzumal verursachten Treibhausgasemissionen entsprechen.

Klimaschutzmassnahmen im Forstsektor sind relativ billig. Kostenschätzungen für einzelne Projekte liegen zwischen 1 und 7 USD/tC. Solche Abschätzungen sind für Hochrechnungen allerdings ungeeignet. Modelle, die die Opportunitätskosten von Massnahmen und die zunehmenden Grenzkosten (Abbildung 11) im Falle grossflächig durchgeführter Klimaschutzprojekte berücksichtigen, kommen auf Kosten von 20 bis 100 USD/tC. Waldschutzprojekte sind aber auch mit Sekundärnutzen verbunden (z.B. Schutz der Artenvielfalt, Regulierung des Wasserhaushaltes, Bodenschutz, Lawinen- und Murenschutz).



**Abbildung 11:** Grenzkosten der Reduktion der Treibhausgasemissionen. Die Gesamtkosten ergeben sich als Fläche unter der Kurve. Sofern die Reduktionen gesamthaft kleiner als A sind, bleiben die Grenzkosten negativ, d.h., eine zusätzliche Reduktionseinheit lohnt sich. Wenn die gesamten Reduktionen grösser sind als A, werden die Grenzkosten positiv, d.h., eine zusätzliche Reduktionseinheit lohnt sich wirtschaftlich nicht.

### 3.3. Hemmnisse und Marktunvollkommenheiten

**Hemmnisse und Marktunvollkommenheiten behindern die Verbreitung von Technologien und Verfahrensweisen. Diese können durch geeignete Politiken und Massnahmen teilweise beseitigt werden.**

Die Verbreitung von Technologien und Verfahren, die zu einer Reduktion der Treibhausgasemissionen führen, wird oft durch Hemmnisse und Marktunvollkommenheiten behindert. Diese sind meist länder- und sektorspezifisch. Zu den generellen Ursachen von Hemmnissen gehören der suboptimale technologische Fortschritt wegen fehlender Anreize, verzerrter Marktpreise und fehlender Märkte für Umweltgüter (z.B. Markt für CO<sub>2</sub>-Emissionszertifikate), Handelsschranken, ineffiziente institutionelle Rahmenbedingungen, Informationsdefizite und soziokulturelle

Verhaltensnormen. Wichtige Hemmnisse in Industrieländern sind der moderne Lebensstil, der viel CO<sub>2</sub> produziert, ressourcenintensive Konsummuster, soziale Strukturen, hohe Fixkosten von Energie- und Verkehrsinfrastrukturen und falsche Anreize (z.B. Energiesubventionen).

Durch geeignete Politiken, Programme und Massnahmen können Hemmnisse zumindest teilweise beseitigt werden, so dass die Lücke zwischen Marktpotentialen von Technologien und Verfahrensweisen einerseits und dem wirtschaftlichen, sozioökonomischen und technischen Potential andererseits verringert oder beseitigt wird.

### 3.4. Instrumente und Massnahmen

**Zur Reduktion der Treibhausgase stehen zahlreiche politische Optionen zur Auswahl, die sowohl Stärken als auch Schwächen aufweisen. Ein breites Portfolio von Massnahmen ermöglicht eine erfolgreiche Klimapolitik. International sollten die Massnahmen und politischen Strategien koordiniert und harmonisiert werden.**

#### **Klimapolitische Massnahmen auf Länderebene:**

Auf Länderebene stehen zahlreiche Massnahmen und Instrumente zur Verfügung, um die Treibhausgasemissionen zu reduzieren. Dazu gehören Lenkungsabgaben auf Emissionen und/oder Energie, handelbare Emissionszertifikate, Subventionen, Vorschriften für technische Produkt- und Prozessstandards, Verbote von Stoffen und Produkten, freiwillige Vereinbarungen und Zielverpflichtungen sowie Informations- und Ausbildungsprogramme. Wichtige Kriterien für die Beurteilung dieser Instrumente sind ihre ökologische Wirksamkeit, die Kosteneffizienz, die politische Machbarkeit, der administrative Aufwand, die wirtschaftlichen Auswirkungen und die Wirkung auf Innovation und Technologiewandel.

Lenkungsabgaben, handelbare Emissionszertifikate und Subventionen werden als marktwirtschaftliche Instrumente bezeichnet. Sie sind oft kosteneffizienter als andere Massnahmen. Lenkungsabgaben und handelbare Zertifikate werden gegenüber Subventionen vorgezogen, weil Letztere oft auch dort verteilt werden, wo sie eigentlich nicht gebraucht werden. Ohne internationale Harmonisierung können marktwirtschaftliche Instrumente kurzfristig zu einer Verschlechterung der wirtschaftlichen Wettbewerbsfähigkeit eines Staates führen.

Standards und Vorschriften sind wirksam und kommen bei einem neu auftretenden umweltpolitischen Handlungsbedarf oft als erste Massnahme zur Anwendung. Freiwillige Vereinbarungen und Verpflichtungen sind neuere Instrumente. Ihre Kosteneffizienz und ihre Wirksamkeit sind noch wenig untersucht. Informations- und Ausbildungsprogramme, insbesondere auch Labels, gewinnen an Bedeutung und tragen zur Überwindung von Marktversagen und Informationsbarrieren sowie zur Bewusstseinsbildung und zu Verhaltensänderungen der einzelnen Akteure bei.

#### **Kombination verschiedener Massnahmen:**

Mit einem Portfolio verschiedener Massnahmen können die gleichzeitig wirksamen Hemmnisse und Marktunvollkommenheiten in einem bestimmten Anwendungsbereich auch gleichzeitig überwunden werden. Die Frage nach dem optimalen Mix ist wissenschaftlich nicht ableitbar, weil die jeweiligen Bedingungen der Akteure nicht vollständig analysierbar sind. In vielen Fällen führt eine Kombination von marktwirtschaftlichen Instrumenten, Standards und Informationsprogrammen (bei

politischer Akzeptanz ergänzt mit gezielten Anreizsubventionen, z.B. für erneuerbare Energien) zu einer ökologisch und wirtschaftlich befriedigenden Lösung. Freiwillige Vereinbarungen können eine solche Strategie ergänzen bzw. ihr zeitlich vorausgehen. Für eine kosteneffiziente Reduktion der Treibhausgase sind Lenkungsabgaben oder handelbare Zertifikate als generelle Rahmenbedingung häufig sinnvoll, um die wirtschaftlichen Potentiale zu erhöhen und die externen Kosten in die Preise zu integrieren.

### **Zusammenspiel mit anderen Politikbereichen:**

Andere Politikbereiche (z.B. Finanz-, Verkehrs-, Siedlungs- und Technologiepolitik) und aktuelle Politiktrends (Liberalisierung der Energiemärkte und die politische Diskussion um die Zukunft einer globalisierten Wirtschaft) können die Entwicklung der Treibhausgasemissionen positiv und/oder negativ beeinflussen. Umgekehrt haben auch klimapolitische Massnahmen einen Rückkopplungseffekt auf andere Politikbereiche. Immer mehr Studien und Simulationen weisen auf ein grosses Synergiepotential zwischen dem Umweltschutz und der Steuerpolitik hin. Eine Verknüpfung dieser beiden Bereiche, z.B. im Rahmen einer ökologischen Steuerreform, kann gleichzeitig die Effizienz des Klimaschutzes und des Steuersystems verbessern, wenn z.B. die Einnahmen zur Verminderung wachstumshemmender Steuern wiederverwendet werden (doppelte Dividende).

### **Internationale flexible Mechanismen:**

International sollten Massnahmen und politische Strategien angepasst und harmonisiert werden, um gleichzeitig die Effizienz der Massnahmen zu verbessern, die Kosten zu senken und Wettbewerbsverzerrungen, Handelskonflikte und unerwünschte Emissionsverlagerungen zu vermeiden. Wichtige Instrumente für die Harmonisierung sind die so genannten flexiblen Mechanismen des Kyoto-Protokolls. Dazu zählen internationale Klimaschutzprojekte (*Joint Implementation* [JI], *Clean Development Mechanism* [CDM]) und der Handel mit Emissionsrechten (*International Emission Trading* [IET]). Diese Instrumente können zu einer globalen Angleichung der Grenzkosten (Abbildung 11) für die Vermeidung von Treibhausgasen führen und so die weltweiten Kosten für die Reduktion der Treibhausgase deutlich senken. Damit das Kosteneinsparpotential der internationalen Instrumente genutzt werden kann, müssen die einzelnen Staaten die flexiblen Mechanismen aus dem Kyoto-Protokoll in ihre nationale Klimapolitik einbeziehen und den Wirtschaftsakteuren den Zugang zu diesen Instrumenten und Märkten erschliessen.

Wirksame und glaubwürdige flexible Mechanismen verlangen griffige und kontrollierbare Regeln und Modalitäten, welche den Missbrauch verhindern, die ökologische Integrität garantieren und unnötige Bürokratie vermeiden. Neben den flexiblen Mechanismen sind das Bereitstellen umweltfreundlicher Technologien und die Vermittlung von *Know-how* in Entwicklungsländern die wichtigsten Elemente einer globalen Strategie zum Schutz des Klimas.

### **Wirtschaftliches Potential der Klimapolitik**

Die Klimapolitik wird nicht selten mit zusätzlichen Kosten und volkswirtschaftlichen Belastungen assoziiert. Fasst man alle klimapolitisch induzierten ökonomischen Veränderungen zusammen, dürfte sich die Erwartung zusätzlicher Kosten als Fehleinschätzung erweisen:

- Es gibt eine grosse Zahl rentabler Möglichkeiten zur Steigerung der Energieeffizienz, die wegen verschiedenen Hemmnissen und Marktunvollkommenheiten – auch in der Schweiz – nicht genutzt werden. Dieses ungenutzte Potential dürfte in der Grössenordnung von mehreren hundert Mio. CHF pro Jahr liegen.
- Mehr Energieeffizienz reduziert die Aufwendungen für Energieimporte der Schweiz (derzeit ca. 4 Mrd. CHF) und induziert zusätzliche inländische Produktion von Industriegütern, Bau- und Dienstleistungen, d.h. zusätzliche Beschäftigung, auch in den Bergkantonen und ländlichen Gebieten.
- Mehr Energieeffizienz und die Nutzung erneuerbarer Energien erhöhen auch das Know-how der Schweizer Technologieproduzenten und der produktbegleitenden Dienstleister, deren Exportumsatz 1999 rund 1,5 Mrd. CHF betrug und bei günstiger Wettbewerbsposition (first mover) binnen 10 Jahren sich mehr als verdreifachen könnte.
- Der intensive Export ressourcenschonender Güter und Dienstleistungen aus den Industrieländern beschleunigt den Prozess des Umwelt- und Klimaschutzes in den Schwellen- und Entwicklungsländern, deren Treibhausgasemissionen dadurch langsamer ansteigen, ebenso deren externe Kosten durch geringere Emissionen konventioneller Luftschadstoffe.
- Der verminderte globale Anstieg der Treibhausgasemissionen und deren weltweite Stagnation binnen der nächsten 20 Jahre würde die Anpassungsinvestitionen durch schwächere Formen der Klimaänderung begrenzen, z.B. in der Schweiz geringere Investitionen für Lawinen-, Murgang- und Hochwasserschutz, geringere Umstrukturierungsinvestitionen in Wintertourismusgebieten bei geringerer Kapitalvernichtung, geringer steigende Versicherungsprämien für Naturkatastrophen.

In der Zusammenfassung der Arbeitsgruppe III wird vermutet, dass der Saldo dieser Kosten und Nutzen eher ein volkswirtschaftlicher Gewinn sein dürfte.

*Prof. Eberhard Jochem*

## **3.5. Kosten der Abschwächung der Klimaänderung**

**Die Kosten der Massnahmen zur Abschwächung der Klimaänderung spielen eine zentrale Rolle bei der Festlegung der angestrebten Ziele und bei der wirtschaftlichen Wirksamkeit der Klimapolitik. Flexibilität kann die Kosten der Reduktion der Treibhausgase entscheidend senken. Die Kosten hängen stark von der Möglichkeit ab, Emissionszertifikate auf internationaler Ebene zu handeln.**

### **Eigenheiten der Länder beeinflussen Kosten:**

Bei sonst gleichen Bedingungen sind die Kosten für diejenigen Länder höher, die weniger von fossilen Brennstoffen abhängig sind. Beispielsweise hat eine Wirtschaft, die bereits stark auf Hydro- und Nuklearenergie beruht (wie die Schweiz), weniger Möglichkeiten, diese Energieträger mit weniger CO<sub>2</sub>-intensiven Energien zu ersetzen.

### **Kosten variieren mit den Zielen:**

Studien für verschiedene Regionen der OECD beziffern die Kosten zur Erreichung der Ziele des Kyoto-Protokolls zwischen 0.2 und 2% (eine Mehrheit der Studien gar auf weniger als 1%) des Bruttoinlandprodukts (BIP) im Jahre 2010, was über einen Zeitraum von 10 bis 12 Jahren ungefähr einer Wachstumseinbusse von 0.02 bis 0.2% pro Jahr entspricht. Zum Vergleich: In den meisten entwickelten Ländern machen die jährlichen Umweltausgaben 1 bis 2% des BIP aus. Die Kosten für das

Ziel, die CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Atmosphäre bei 450 ppm zu stabilisieren, sind höher als bei einer Stabilisierung bei 750 ppm, mit einer starken Zunahme zwischen 550 und 450 ppm.

### **Manche Instrumente senken Kosten:**

Die Kosten der Klimapolitik können gesenkt oder gar vermieden werden, sofern von folgenden Möglichkeiten Gebrauch gemacht wird: *No-Regrets*-Politiken (Massnahmen, die an und für sich wirtschaftlich sind, wie z.B. das Streichen der Subventionen auf fossilen Brennstoffen, die aber wegen Marktversagen und Informationsbarrieren kaum ergriffen werden); die Berücksichtigung von Sekundärnutzen (beispielsweise die Nutzen für die Gesundheit, die lokal aus der Reduktion der Luftverschmutzung hervorgehen, vgl. Kapitel 2.4); die doppelte Dividende bei Instrumenten, die auf Steuereinnahmen beruhen (beispielsweise die Verwendung der Einnahmen aus Lenkungsabgaben zur Reduktion von Steuern mit stark verzerrender Wirkung) sowie die internationalen flexiblen Mechanismen (JI, CDM und IET). Die Untersuchungen zeigen, dass die Instrumente, die auf Abgaben beruhen, bei richtiger Anwendung am wirksamsten sind, um die Kosten zu minimieren.

### **Steuer- und Energiesysteme beeinflussen Kosten:**

Es besteht kein enger Zusammenhang zwischen der Höhe einer CO<sub>2</sub>-Abgabe, die nötig ist, um eine angestrebte Emissionsreduktion zu erreichen, und den resultierenden Einbussen des BIP. Im Allgemeinen sind die CO<sub>2</sub>-Abgaben in den europäischen OECD-Ländern und Japan am höchsten, während die resultierenden BIP-Verluste in den USA und den übrigen OECD-Ländern am höchsten sind. Das Fehlen eines Zusammenhangs kann mit den bestehenden Strukturen des Steuer- und Energiesystems dieser Länder und den ökonomischen Besonderheiten ihrer Strukturen und Politiken erklärt werden.

Wegen des relativ grösseren Anteils der Energiekosten in Haushalten mit niederen Einkommen sind die Auswirkungen einer CO<sub>2</sub>-Abgabe für untere Einkommensschichten verhältnismässig gross. Dieser unerwünschte Effekt kann durch Rückerstattung der Steuereinnahmen an die unteren Einkommensschichten vollumfänglich oder teilweise kompensiert werden.

### **Flexibilität senkt Kosten:**

Je mehr Flexibilität, desto tiefer die Kosten und umgekehrt. Flexibilität wird im Kyoto-Protokoll durch die flexiblen Mechanismen (JI, CDM und IET), die Möglichkeit der Anrechnung von CO<sub>2</sub>-Senken, den Einbezug weiterer Treibhausgase neben CO<sub>2</sub> und durch eine Verpflichtungsperiode von 5 Jahren (statt nur einem Jahr) geschaffen. Die Modelle neigen allerdings manchmal zur Überschätzung des Sparpotentials der flexiblen Massnahmen, weil sie die Transaktions-, Umsetzungs- und Kontrollkosten nicht berücksichtigen.

Die Möglichkeit, mit Emissionsrechten auf internationaler Ebene zu handeln, kann die Kosten der Treibhausgasreduktion senken. Alle Studien weisen sowohl auf makroökonomischer als auch auf sektorieller Ebene auf bedeutende Kosteneinsparungen hin, wenn die Grösse dieses Marktes zunimmt. Für den auf die Länder des Annex B des Kyoto-Protokolls limitierten Markt belaufen sich die Kosten zur Erreichung der Kyoto-Ziele über ein Jahrzehnt auf eine Reduktion des BIP von 1%. Die nationalen Grenzkosten (Abbildung 11), die ohne Handel bis auf 600 USD/tC steigen können, verringern sich somit auf 150 USD/tC. Studien, die auch die Schweiz einbeziehen, bestätigen dieses Resultat. Einschränkungen des internationalen Marktes oder der Umsetzung des weltweiten Handels können die wirtschaftliche Wirksamkeit der Massnahmen reduzieren.

Die Kosten und Nutzen klimapolitischer Massnahmen hängen vor allem von der Anzahl der Mitgliedsstaaten internationaler Abkommen sowie der Höhe der eingegangenen Verpflichtungen zur Begrenzung der Treibhausgasemissionen ab. Es kann klimapolitisch sinnvoll sein, internationale Klimaabkommen mit Teilabkommen zu beginnen und diese durch geeignete Anreize auf andere Länder auszuweiten.

### **Gewinner und Verlierer:**

Die erwarteten Gewinner der Strategien zur Abschwächung der Klimaänderung sind namentlich die Sektoren der erneuerbaren Ressourcen (inkl. Hydroelektrizität), der Dienstleistungen, der Landwirtschaft und der emissionsenkenden Technologien. Zu den erwarteten Verlierern gehören die Kohle- und eventuell Erdölindustrie sowie energieintensive Sektoren wie z.B. die Chemie und die Metallindustrie. Die Verluste zeigen sich oft in Form einer reduzierten Wachstumsrate des jeweiligen Sektors. Viele Untersuchungen neigen aber dazu, die Kosten zu überschätzen. Oft werden Faktoren vernachlässigt, welche die negativen Wirkungen für die betroffenen Sektoren vermindern können. Werden den kohlenstoffintensiven Industrien Erleichterungen eingeräumt, um die negativen Wirkungen zu vermindern, so werden die Kosten für andere Sektoren sowie die Gesamtkosten viel höher sein.

---

# Literatur

---

IPCC, 2000. *Special Report on Emissions Scenarios*. Cambridge University Press, Cambridge, U.K.

IPCC, 2001. *Climate Change 2001: The Scientific Basis*. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, U.K.

IPCC, 2001. *Climate Change 2001: Impacts, Adaptation, and Vulnerability*. Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, U.K.

IPCC, 2001. *Climate Change 2001: Mitigation*. Contribution of Working Group III to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, U.K.

IPCC, 2002. *Climate Change 2001: Synthesis Report*. Cambridge University Press, Cambridge, U.K.

Die Berichte *Climate Change 2001* sind auf dem Web abrufbar unter [www.ipcc.ch/pub/tar](http://www.ipcc.ch/pub/tar).

---

# Glossar

---

Aerosole	Kleinste Schwebeteilchen in der Luft (typische Grösse: 0.01 bis 10 µm). Aerosole können entweder natürlichen (z.B. Vulkanausbruch) oder menschlichen (z.B. Verbrennungsprozesse) Ursprungs sein.
Akteure	Individuen, Gruppen, Organisationen etc., die politisch und/oder ökonomisch handeln.
Arid/semiarid	Trockenes Klima, in welchem der Jahresniederschlag insgesamt geringer ist als die Jahresverdunstung. In semiariden Regionen ist der Niederschlag während drei bis fünf Monaten grösser als die Verdunstung.
Atmosphäre	Die gasförmige Hülle, die die Erde umgibt. Die trockene Atmosphäre besteht hauptsächlich aus Stickstoff (78.1 Volumen-%), Sauerstoff (20.9 Vol.-%) und Spurengasen wie Argon (0.93 Vol.-%), Kohlendioxid (0.035 Vol.-%) und Helium (0.0005 Vol.-%). Zusätzlich enthält die Atmosphäre Wasserdampf, das wichtigste Treibhausgas, dessen Menge regional stark schwankt, aber typischerweise bei 1 Vol.-% liegt.
Biosphäre	Der Teil des Systems Erde, der alle Ökosysteme und lebenden Organismen in der Atmosphäre, auf dem Land oder im Meer umfasst, inklusive totem organischem (pflanzlichem) Material auf dem Land und im Wasser.
Biotreibstoffe	Treibstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen, z.B. aus Rapsöl oder Holz. Im Gegensatz zu fossilen Treibstoffen ist die Verbrennung von Biotreibstoffen bei nachhaltiger Nutzung CO <sub>2</sub> -neutral. Die gleiche Menge CO <sub>2</sub> , die bei der Verbrennung freigesetzt wird, wird beim Nachwachsen des Rohstoffs wieder gebunden.
Brennstoffzelle	Wasserstoff und Sauerstoff werden in Brennstoffzellen in elektrische Energie und Wärme umgewandelt.
CDM	siehe <i>Clean Development Mechanism</i>
CH <sub>4</sub>	siehe <i>Methan</i>
Clean Development Mechanism	Einer der drei „flexiblen Mechanismen“ des Kyoto-Protokolls. Der Clean Development Mechanism ermöglicht Industrie- und Entwicklungsländern, gemeinsam Klimaschutz-Projekte in den Entwicklungsländern durchzuführen. Dabei wird das Projekt (z.B. die Errichtung einer Windkraftanlage) vom Industrieland finanziert. Die dadurch im Entwicklungsland vermiedenen Treibhausgasemissionen darf das Industrieland in seiner Treibhausgasbilanz verbuchen. Ein Teil des Finanztransfers im Rahmen der CDM-Projekte fließt in einen Fonds zugunsten der am meisten vom Klimawandel betroffenen Staaten.
CO <sub>2</sub>	siehe <i>Kohlendioxid</i>
Dengue-Fieber	Eine von Mücken übertragene ansteckende Virenkrankheit, oft auch „Breakbone Fever“ genannt, weil sie mit starken Schmerzen in Gelenken und Rücken verbunden ist. Folgeinfektionen durch das Virus können zu „Dengue Hemorrhagic Fever“ (DHF) und zum Dengue-Schock-Syndrom (DSS) führen, die tödlich sein können. Dengue-Fieber ist in den Tropen und Subtropen verbreitet. In Europa und den USA wird Dengue-Fieber gelegentlich bei Fernreisenden diagnostiziert.
Doppelte Dividende	Manche Instrumente zum Schutz des Klimas basieren auf Abgaben. Als doppelte Dividende wird der Effekt bezeichnet, dass einerseits mit solchen Instrumenten Treibhausgasemissionen beschränkt oder gesenkt werden, und andererseits durch Verwendung des Abgabeertrags zum Abbau von Steuern allfällige Wohlfahrtseinbussen zumindest teilweise ausgeglichen werden können.
Emissionshandel	Emissionsreduktionen können in Form von Emissionszertifikaten gehandelt und an Länder verkauft werden, die ihr Reduktionsziel nicht erreichen. Der Handel kann innerhalb eines Unternehmens, innerhalb eines Landes oder zwischen den Ländern stattfinden. Der internationale

	Emissionshandel (International Emission Trading – IET) ist einer der drei „flexiblen Mechanismen“ des Kyoto-Protokolls (siehe <i>flexible Mechanismen</i> ).
Emissionsszenario	Eine plausible Beschreibung der zukünftigen Entwicklung der Emissionen von Substanzen, die auf Annahmen über treibende Kräfte und Wechselwirkungen zwischen diesen (z.B. Bevölkerungsentwicklung und sozioökonomische Veränderungen oder Technologiewandel) basiert.
Externe Kosten	Kosten, die nicht in den Marktpreisen von Gütern oder Dienstleistungen enthalten sind (z.B. Gesundheits-, Vegetations- und Gebäudeschäden). Sie belasten nicht die eigentlichen Verursacher, sondern die Allgemeinheit.
Extremereignis	Ein Ereignis, das selten auftritt. Ein „extremes Wetterereignis“ ist ein an einem bestimmten Ort selten auftretendes einzelnes Wetterereignis. Ein „extremes Klimaereignis“ ist ein selten auftretender Durchschnitt einer Anzahl von Wetterereignissen über eine bestimmte Zeitspanne (z.B. die saisonale Regenmenge). Aus der Sicht des Menschen sind sozioökonomische Aspekte wichtig, und deshalb werden Extremereignisse meist als grosse Schadenereignisse wahrgenommen..
Flexible Mechanismen	Die drei flexiblen Mechanismen des Kyoto-Protokolls sind Clean Development Mechanism (CDM), Emissionshandel (IET) und Joint Implementation (JI). Der Grundgedanke der drei Instrumente ist die Steigerung der Kosteneffizienz von klimapolitischen Massnahmen, indem Emissionsreduktionen dort erfolgen, wo sie am billigsten sind.
Fossile Brennstoffe	Brennstoffe aus nicht erneuerbaren Kohlenstofflagerstätten. Fossile Brennstoffe sind Kohle, Erdöl und Erdgas.
GtC	Gigatonnen Kohlenstoff. $1 \text{ GtC} = 10^{12} \text{ kg Kohlenstoff} = 3.67 \cdot 10^{12} \text{ kg CO}_2$ .
Hemmnisse	Eine Hürde beim Ausschöpfen eines Potentials (z.B. des Potentials neuer Technologien). Ein Hemmnis kann durch eine politische Strategie, durch ein Programm oder durch eine Massnahme überwunden werden.
HFC	Wasserstoffhaltige Fluor-Kohlenwasserstoffe (hydrofluorocarbons) gehören zu den sechs Treibhausgasen, die laut dem Kyoto-Protokoll reduziert werden sollen. HFCs haben ein grosses Treibhauspotential. Sie werden vorwiegend als Kühlmittel verwendet.
Hybrid-Fahrzeug	Fahrzeug, das für seinen Antrieb mindestens zwei Typen von Energiequellen nutzt, wobei meist ein Verbrennungsmotor mit einem Elektroantrieb gekoppelt wird.
IET	siehe <i>Emissionshandel</i>
International Emission Trading	Einer der drei „flexiblen Mechanismen“ des Kyoto-Protokolls. (siehe <i>Emissionshandel</i> ).
Inversionslage	Normalerweise nimmt die Temperatur in der Atmosphäre mit der Höhe ab. Während Inversionslagen (Inversion=Umkehrung) schieben sich wärmere Luftmassen über kältere. Die Temperatur in Bodennähe ist dann kälter als in der Höhe.
IPCC	Zwischenstaatlicher Ausschuss über Klimaänderung (Intergovernmental Panel on Climate Change). IPCC wurde 1988 von der Welt-Meteorologie-Organisation (WMO) und dem Umwelt-Programm der Vereinten Nationen (UNEP) aus der Erkenntnis gegründet, dass die Klimaänderung globale Probleme bewirken kann. Ziel des Organs ist es, wissenschaftliche, technische und sozioökonomische Informationen zum besseren Verständnis der Risiken der vom Menschen hervorgerufenen Klimaänderung zusammenzutragen, auszuwerten und in Berichten zu veröffentlichen. Die Berichte basieren auf der Arbeit von weltweit rund 2500 anerkannten Forschenden und dienen in erster Linie als Entscheidungsgrundlage für politische Entscheidungsträger.
JI	siehe <i>Joint Implementation</i>

Joint Implementation	Einer der drei „flexiblen Mechanismen“ des Kyoto-Protokolls. Joint Implementation erlaubt es industrialisierten Ländern oder Unternehmen aus diesen Ländern, Projekte zur Verminderung von Emissionen oder zum Ausbau von Senken gemeinsam mit anderen Industrieländern gemäss Anhang B des Kyoto-Protokolls umzusetzen und die dabei entstehenden Emissionsreduktionen zu teilen.
Klima	Klima wird normalerweise als „Durchschnittswetter“ definiert, oder genauer als statistische Beschreibung von Durchschnittswerten und Schwankungsbereichen klimatologischer Grössen wie Temperatur, Niederschlag und Wind über längere Zeit. Der klassische, von der Welt-Meteorologie-Organisation (WMO) definierte Zeitraum ist drei Jahrzehnte.
Klimaänderung	Der Begriff bezieht sich innerhalb des IPCC-Berichts auf jede Änderung des Klimas im Verlauf der Zeit, sei dies aufgrund natürlicher Schwankungen oder menschlicher Aktivitäten.
Klimaszenario	Eine plausible und oft vereinfachte Beschreibung des zukünftigen Klimas, die auf einer in sich konsistenten Reihe von klimatologischen Beziehungen beruht. Dieses Set wird eigens zum Zweck konstruiert, die möglichen Folgen einer vom Menschen verursachten Klimaänderung zu erforschen. Ein Klimaszenario dient oft als Grundlage für Modelle über die Auswirkungen der Klimaänderung.
Klimazonen	Das Klima der Erde lässt sich vom Äquator zu den Polen grob in gürtelförmige Zonen gliedern. Diese kommen im Wesentlichen durch die unterschiedliche Sonneneinstrahlung zustande und unterscheiden sich durch charakteristische Temperaturen, Niederschläge etc.. „Gemässigte Zone“ bezeichnet die Klimazone in mittleren Breiten, die vom Westwindssystem geprägt ist und typische jahreszeitliche Temperaturschwankungen aufweist.
Kohlendioxid (CO <sub>2</sub> )	Ein natürlich vorkommendes Gas, das u.a. bei der Verbrennung kohlenstoffhaltiger Materialien entsteht. Es ist das wichtigste vom Menschen produzierte Treibhausgas, da es die Strahlungsbilanz der Erde gesamthaft am stärksten beeinflusst. Kohlendioxid ist eines der sechs Treibhausgase, die laut dem Kyoto-Protokoll reduziert werden sollen.
Kyoto-Protokoll	Das Kyoto-Protokoll wurde 1997 an der dritten Vertragsparteienkonferenz (COP – Conference of the Parties) des Rahmenübereinkommens der Vereinten Nationen über Klimaänderungen (UNFCCC) in Kyoto, Japan, verabschiedet. Die Länder, die in Anhang B des Protokolls aufgeführt sind (die meisten OECD-Staaten und Länder im Übergang von Planwirtschaft zu Marktwirtschaft), vereinbarten eine Reduktion der Emission der wichtigsten Treibhausgase (CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , N <sub>2</sub> O, HFCs, PFCs und SF <sub>6</sub> ) um mindestens 5% unter den Stand von 1990 innerhalb des Verpflichtungszeitraums von 2008 bis 2012. Das Kyoto-Protokoll tritt in Kraft, sobald es mindestens 55 Länder ratifiziert haben, die zusammen für mindestens 55% der Treibhausgasemissionen der Industrieländer im Jahr 1990 verantwortlich sind.
Lachgas (N <sub>2</sub> O)	Lachgas oder Distickstoffoxid ist eines der sechs Treibhausgase, die laut dem Kyoto-Protokoll reduziert werden sollen.
Landnutzungsänderung	Eine Änderung in der Nutzung oder Bewirtschaftung des Landes kann zu Veränderungen in der Vegetationsbedeckung führen. Dies kann sich auf die Albedo (Anteil der Sonnentrahlung, die an der Oberfläche reflektiert wird), auf die Verdunstungsrate von Wasserdampf und auf die Speicherkapazität für Kohlenstoff oder auf andere wichtige Komponenten des Klimasystems auswirken.
Leishmaniose	Durch den Biss von Sandflöhen verursachte Krankheit, die sich äusserlich („Hautleishmaniose“) Wochen oder Monate nach der Infektion in Hautwunden (offen oder geschlossen) oder innerlich („innere Leishmaniose“) Monate bis Jahre nach der Infektion durch Fieber, Milz-

	und Lebervergrößerungen und Blutarmut manifestieren kann. Leishmaniose ist in tropischen und subtropischen Klimazonen einschliesslich der Mittelmeerländer (z.B. Italien, Spanien, Portugal) verbreitet.
Lenkungsabgabe	Abgabe (Steuer) auf einem Produkt, um dessen Verbrauch einzuschränken.
Malaria	Von einer Mückenart übertragene Krankheit, die vor allem in warmen Regionen auftritt und starke Fieberanfälle und Störungen der Körpersysteme verursacht. Jedes Jahr sterben etwa zwei Millionen Menschen an Malaria.
Methan (CH <sub>4</sub> )	Ein Treibhausgas, das unter anderem aus Sumpfbereichen oder durch landwirtschaftliche Tätigkeiten (Reisanbau und Viehzucht) in die Atmosphäre gelangt. Es ist eines der sechs Treibhausgase, die laut dem Kyoto-Protokoll reduziert werden sollen.
Murgang	Eine Schlammlawine aus Erde, Wasser und festen Bestandteilen (z.B. Schutt, Steine, Holz), die an steilen Berghängen durch ergiebige oder heftige Niederschläge ausgelöst werden kann.
N <sub>2</sub> O	siehe <i>Lachgas</i>
O <sub>3</sub>	siehe <i>Ozon</i>
OECD	Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (Organisation of Economic Cooperation and Development)
Ökosystem	Ein System von sich gegenseitig beeinflussenden lebenden Organismen und ihrer physischen Umwelt, auf dem Land oder im Wasser. Die Grenzen werden unterschiedlich definiert, weshalb ein Ökosystem sehr kleinräumig bis gar weltumspannend sein kann.
Opportunitätskosten	Folgekosten, die entstehen, wenn in einem Bereich (z.B. Bildung) die finanziellen Mittel fehlen, weil in einem andern Bereich, der im Moment als dringlicher erachtet wird (z.B. Rüstung), viel investiert wird.
Ozon (O <sub>3</sub> )	Molekül aus drei Sauerstoffatomen. In der Troposphäre wird Ozon sowohl natürlich als auch unter Einbezug von Gasen menschlichen Ursprungs gebildet. In hohen Konzentrationen kann troposphärisches Ozon auf viele Organismen (z.B. auf den Menschen) schädigend wirken. Troposphärisches Ozon wirkt als Treibhausgas. In der Stratosphäre wird Ozon durch das Zusammenwirken von solarer Ultraviolettstrahlung und molekularem Sauerstoff (O <sub>2</sub> ) gebildet. Stratosphärisches Ozon spielt eine entscheidende Rolle in der Strahlungsbilanz der Erde. Der Abbau stratosphärischen Ozons infolge chemischer Reaktionen, die durch die Klimaänderung verstärkt werden können, hat eine Zunahme der ultravioletten (UV-)B-Strahlung in Bodennähe zur Folge.
PFC	Perfluorierte Kohlenwasserstoffe (z.B. CF <sub>4</sub> und C <sub>2</sub> F <sub>6</sub> ) sind Treibhausgase, die laut dem Kyoto-Protokoll reduziert werden sollen. PFCs sind sehr langlebige und haben ein grosses Treibhauspotential. Sie entstehen vorwiegend bei der Aluminium- und Halbleiterproduktion.
Permafrost	Bereich des Untergrunds, der ganzjährig Temperaturen unter 0°C aufweist und meist viel Eis enthält.
ppm, ppb	Verhältnis der Anzahl Teilchen einer Komponente (z.B. eines Treibhausgases) zur Anzahl Teilchen aller Komponenten innerhalb eines gegebenen Volumens. ppm, parts per million: Teile pro Million. ppb, parts per billion: Teile pro Milliarde.
Rückversicherung	Versicherung, die das Risiko der Versicherungsbranche deckt: eine „Versicherung für Versicherungen“.
SAR	2. Wissensstandsbericht des IPCC (siehe <i>Wissensstandsberichte des IPCC</i> )
Sekundärnutzen	Positive Nebeneffekte von Massnahmen, die auf die Verminderung der Klimaänderung abzielen. Klimaschutzstrategien haben nicht nur einen Einfluss auf Treibhausgasemissionen, sondern auch auf die Effizienz der Ressourcennutzung und auf Problembereiche wie Gesundheit,

	Beschäftigung, Transport, Landwirtschaft, Praktiken in der Landnutzung und Sicherheit von Brennstoffen.
Senken	Prozesse, Aktivitäten oder Mechanismen, die ein Treibhausgas, ein Aerosol oder deren Vorläufer aus der Atmosphäre entfernen. Wachsende Wälder und andere wenig genutzte Vegetationsflächen sowie die Ozeane können der Atmosphäre CO <sub>2</sub> entziehen, indem sie Kohlenstoff einlagern. Manche Senken können beispielsweise durch eine gebremste Entwaldung oder durch Aufforstungen vergrößert oder als Kohlenstoffspeicher bewahrt werden.
SF <sub>6</sub>	Schwefelhexafluorid ist eines der sechs Treibhausgase, die laut dem Kyoto-Protokoll reduziert werden sollen. Es wird vorwiegend vom Menschen produziert und als Isolier- und Kühlgas verwendet. SF <sub>6</sub> ist lang- lebig (3200 Jahre) und hat das grösste Treibhauspotential der bekannten Gase.
Sonnenaktivität	Die Sonne weist Perioden unterschiedlicher Aktivität auf, die sich in der Anzahl der Sonnenflecken, in der Abstrahlungsintensität der Sonne, in der magnetischen Aktivität und in der Emission von hochenergetischen Teilchen ausdrücken. Diese Variationen finden auf Zeitskalen von Minuten bis zu Millionen von Jahren statt. Am bekanntesten ist der 11-Jahres-Zyklus der Sonnenaktivität: ungefähr alle 11 Jahre tritt ein Aktivitätsmaximum auf.
SRES-Szenarien	40 Szenarien des IPCC-Spezialberichts über Emissionsszenarien (Special Report on Emission Scenarios, SRES), die als Basis für Abschätzungen der Klimaentwicklung verwendet wurden.
Strahlungsbilanz	Strahlungsenergie-Budget der Erde, das sich aus der kurzwelligen Sonneneinstrahlung und der langwelligen Rückstrahlung und Absorbierung durch Erdoberfläche, Wolken, Aerosole und Treibhausgase zusammensetzt.
Stratosphäre	Schicht der Atmosphäre oberhalb der Troposphäre in etwa 10 bis 50 km Höhe.
Szenario (allgemein)	Eine plausible und oft vereinfachte Beschreibung, wie bestimmte Parameter sich in Zukunft entwickeln könnten. Ein Szenario basiert auf einer in sich konsistenten Reihe von Annahmen betreffend der treibenden Kräfte und Zusammenhänge. Siehe auch <i>Klimaszenario</i> und <i>Emissionsszenario</i> .
TAR	3. Wissensstandsbericht des IPCC (siehe <i>Wissensstandsberichte des IPCC</i> )
Temperaturinversion	siehe <i>Inversionslage</i>
Thermische Ausdehnung	Eine Zunahme des Volumens (Abnahme der Dichte) von Wasser aufgrund einer Erwärmung.
Treibhauseffekt	Treibhausgase (darunter auch Wasserdampf) und Wolken sind durchlässig für einen Teil der kurzwelligen Sonneneinstrahlung und absorbieren und streuen die an Erdoberfläche und Wolken reflektierte langwellige (Infrarot-)Strahlung. So wird im System Erdoberfläche-Troposphäre Wärme eingefangen. Dieser „natürliche Treibhauseffekt“ ermöglicht das Leben auf der Erde. Wegen der Zunahme der Treibhausgaskonzentrationen seit dem Beginn der Industrialisierung wird die Atmosphäre undurchlässiger für Infrarotstrahlen. Dieser „zusätzliche Treibhauseffekt“ führt zu einer zusätzlichen Erwärmung der Troposphäre.
Treibhausgase	Gasförmige Bestandteile der Atmosphäre, die die langwellige (Infrarot-) Strahlung von Erdoberfläche, Atmosphäre und Wolken absorbieren und ihrerseits langwellige Strahlung in alle Richtungen ausstrahlen. Dadurch erwärmt sich die Atmosphäre. Wasserdampf (H <sub>2</sub> O), Kohlendioxid (CO <sub>2</sub> ), Lachgas (N <sub>2</sub> O), Methan (CH <sub>4</sub> ) und Ozon (O <sub>3</sub> ) sind die wichtigsten Treibhausgase in der Erdatmosphäre. Ihre Konzentrationen werden durch menschliche Aktivitäten erhöht. Ausserdem gibt es Treibhausgase, die vorwiegend vom Menschen produziert sind, wie PFCs, HFCs und SF <sub>6</sub> .

---

Troposphäre	Unterste Schicht der Atmosphäre. Ihre Mächtigkeit beträgt ungefähr 10 km (9 km in hohen Breitengraden und 16 km in den Tropen). In der Troposphäre spielt sich das Wetter ab. Die Temperatur nimmt normalerweise mit zunehmender Höhe ab.
USD/tC	US Dollar pro Tonne Kohlenstoff.
UV-B-Strahlung	Ultraviolette Strahlung. Kurzwellige solare Strahlung, die grösstenteils vom stratosphärischen Ozon absorbiert wird. Durch die Ausdünnung der Ozonschicht in der Atmosphäre erhöht sich die UV-B-Einstrahlung auf die Erdoberfläche, was sich negativ auf die Gesundheit vieler lebender Organismen, einschliesslich des Menschen, auswirkt.
Vegetationsperiode	Die Zeitspanne im Jahr, in welcher pflanzliches Wachstum möglich ist. Deren Länge hängt vor allem von der Temperatur, aber auch von Niederschlagsmenge und Schneebedeckung ab. In Mitteleuropa dauert die Vegetationsperiode von April bis Anfang Oktober.
Wissensstandsberichte des IPCC	Die umfassenden Wissensstandsberichte des IPCC erscheinen ca. alle 5 Jahre. Der erste Bericht (First Assessment Report) erschien 1990, der zweite Bericht (SAR – Second Assessment Report) 1996 und der dritte (TAR – Third Assessment Report) im Jahr 2001.
Wm <sup>-2</sup>	Watt pro Quadratmeter. Masseinheit des Energieflusses (Z.B. Strahlungsbilanz der Erde).