

# 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.

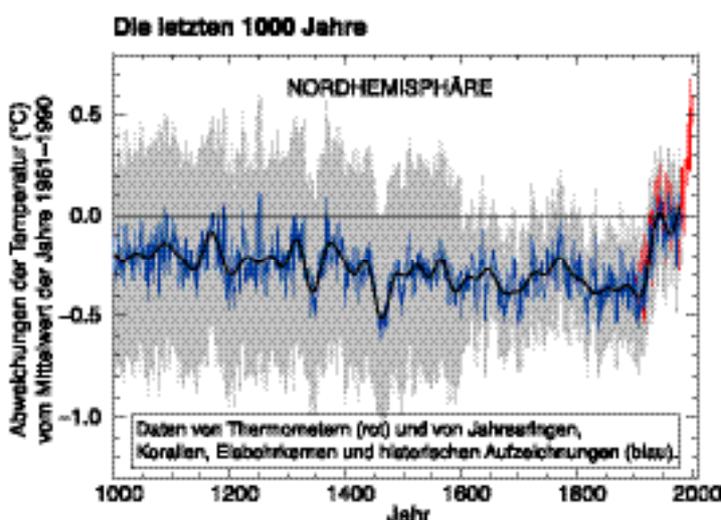
Für Abschätzungen der Unsicherheit werden in diesem Kapitel die Begriffe der Arbeitsgruppe I des IPCC verwendet: *praktisch sicher* (>99% Wahrscheinlichkeit, dass die Aussage zutrifft), *sehr wahrscheinlich* (90–99%), *wahrscheinlich* (66–90%), *mittlere Wahrscheinlichkeit* (33–66%), *unwahrscheinlich*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

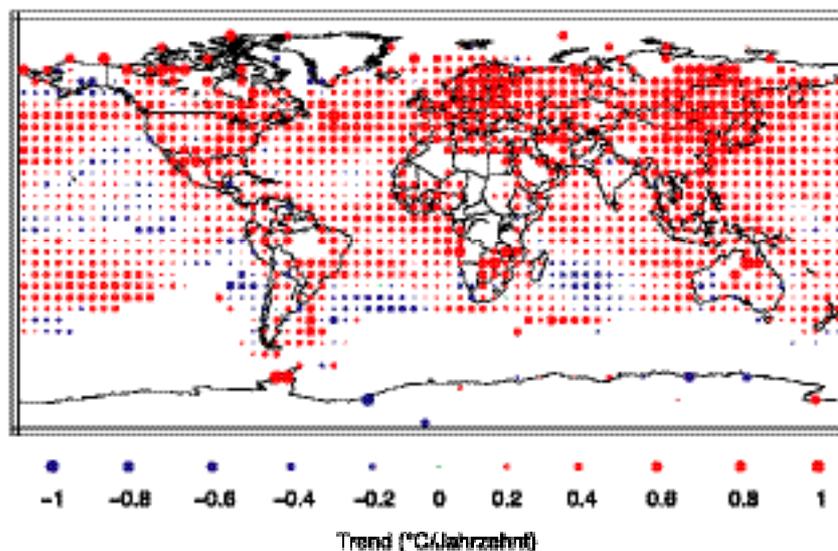


**Abbildung 1:** Temperaturanstiege wie seit 1910 sind in dieser Dauer und Grösse in den letzten 1000 Jahren nie aufgetreten. Direkte Messungen in Rot, rekonstruierte Werte in Blau, Mittelwertskurve (50-Jahr gleitendes Mittel) in Schwarz. Unsicherheiten (grau) werden mit zunehmendem Alter der Daten grösser.

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 Tageschwankungen 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.

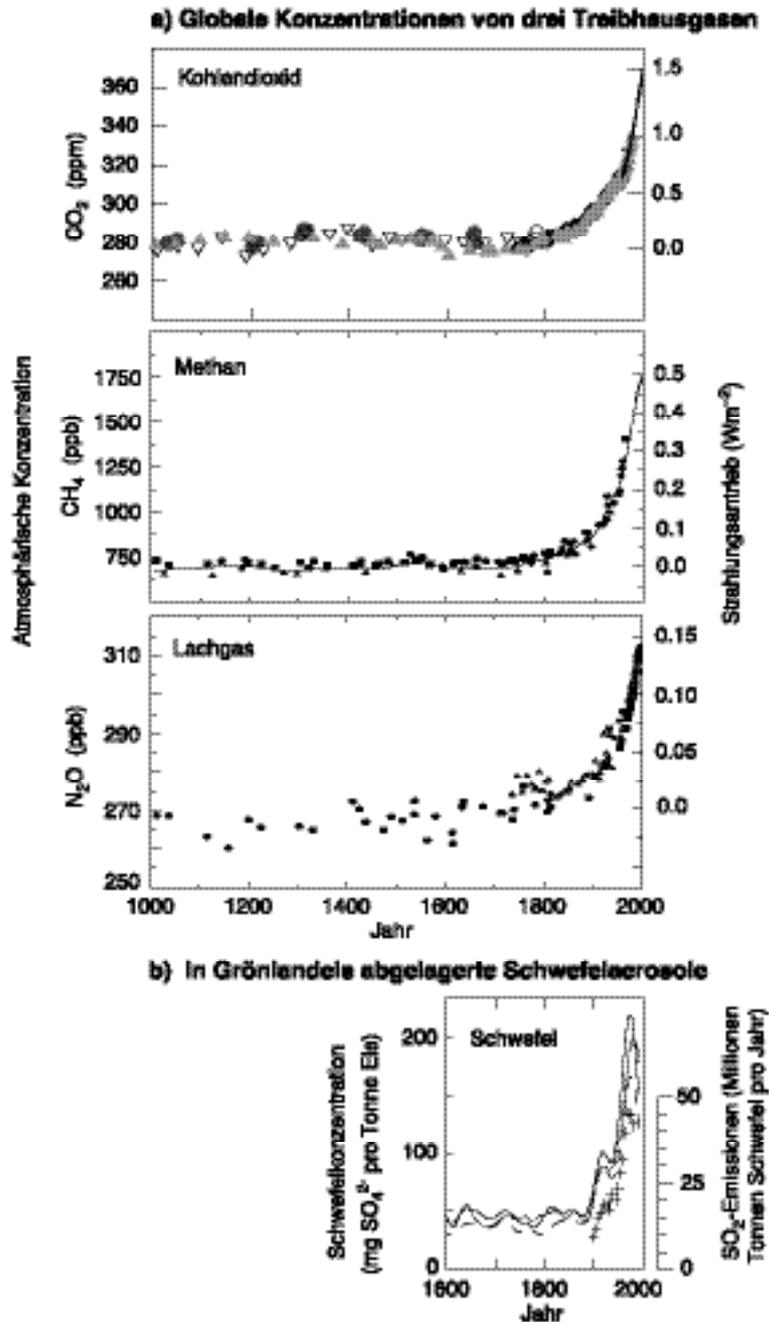
<sup>2</sup> Säntis, Davos, Zürich, Engelberg, Bern, Basel, Chaumont

<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 ( $\text{CO}_2$ ), Methan ( $\text{CH}_4$ ) und Lachgas ( $\text{N}_2\text{O}$ ) 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.**

Treibhausgase 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 Treibhausgase in der Atmosphäre:

Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ ), Methan ( $\text{CH}_4$ ) und Lachgas ( $\text{N}_2\text{O}$ ) sind neben Wasserdampf die wichtigsten Treibhausgase. 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 Treibhausgase 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

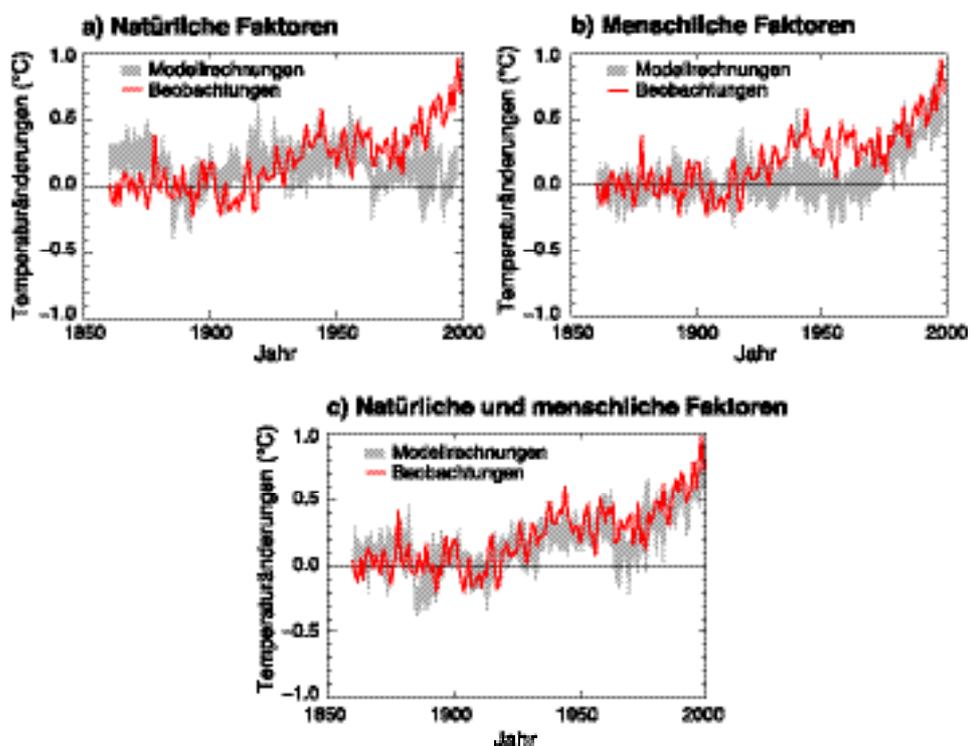
deren Abschätzungen noch ungenügend abgesichert. Verglichen mit der Erhöhung der Strahlungsbilanz um  $2.43 \text{ Wm}^{-2}$  durch den Anstieg der Treibhausgaskonzentrationen sind sie relativ klein.

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

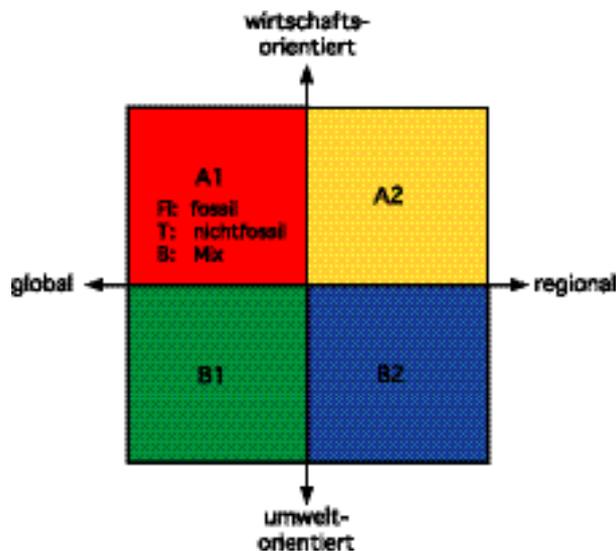
**Menschliche Einflüsse werden die Zusammensetzung der Atmosphäre weiterverändern. Die mittlere globale Temperatur steigt in allen Szenarien ohne klimapolitische Massnahmen an. In nördlichen Breiten werden die Niederschläge wahrscheinlich zunehmen.**

### 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.

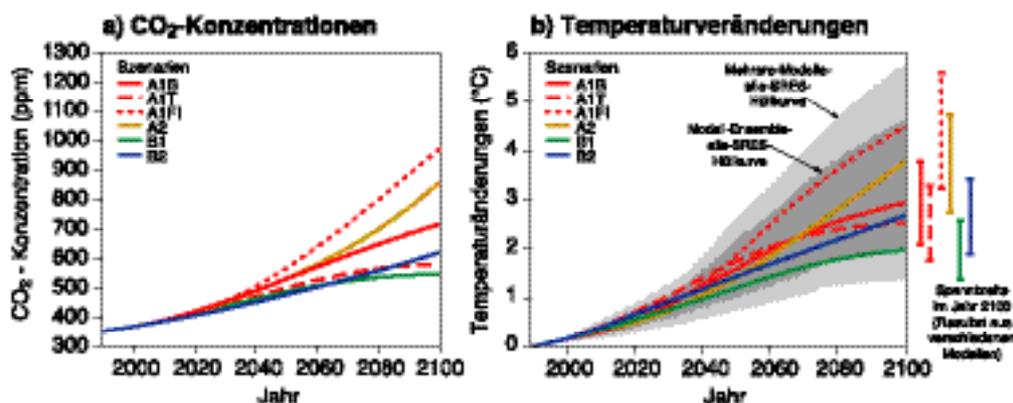
- B2, nachhaltigkeitsorientiert und regional: Regionale Lösung der Probleme, langsam steigende Bevölkerung, mässiges Wirtschaftswachstum mit regionalen Unterschieden, „lokale Nachhaltigkeit“.

### 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

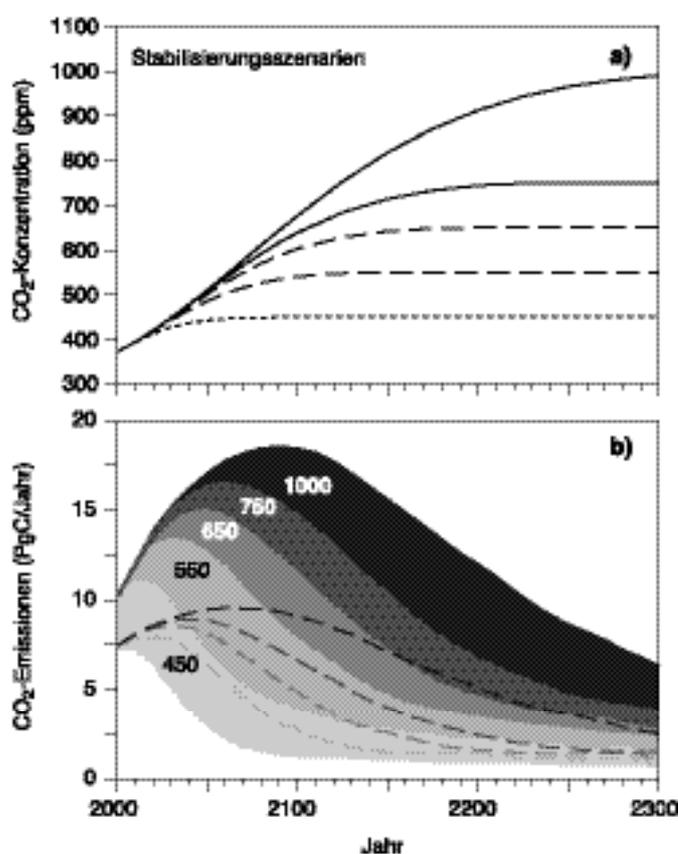
es zurzeit nur ungenügende Information, um Trends abschätzen zu können, weil die globalen Klimamodelle für verlässliche Vorhersagen noch nicht genügend räumlich aufgelöst sind. Zum Beispiel werden kleinräumige Wetterphänomene wie Gewitter, Tornados und Hagel in Klimamodellen nicht simuliert.

### 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.

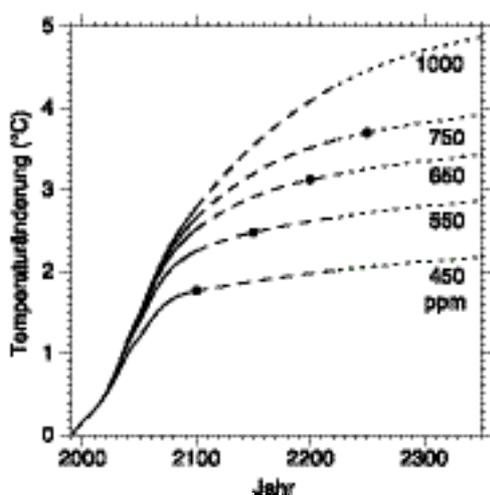
## 1.5. Stabilisierungsszenarien und ihre Konsequenzen

**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*