

# Das Klima

## Der Wandel und die Fragen



Herbert Kroll

Geo-Museum Zurholt Altenberge e. V.



## Vorbemerkung

Der Klimawandel der Gegenwart und Vergangenheit ist ein wesentlicher Teil des Themenspektrums, das im Geo-Museum Zurholt, Altenberge, behandelt wird. Es werden dort aber nicht Bedrohungsszenarien vorgestellt -, steigende Meeresspiegel, Hitzewellen, Dürrekatastrophen, dies kennen wir aus der öffentlichen Diskussion -, sondern es wird über den Hintergrund des Wandels aufgeklärt.

Die Berichte der Medien machen klar: Kohlenstoffdioxid, CO<sub>2</sub>, hat den Schwarzen Peter. Was aber ist das Böse am CO<sub>2</sub>? Warum ist der Klimawandel menschengemacht? Warum muss der CO<sub>2</sub>-Gehalt der Atmosphäre runter und Lebens- und Arbeitswelt müssen verändert werden?

Es ist verständlich, dass der Gedanke an den notwendigen Systemumbau Unbehagen bereitet. Andererseits aber ist die breite Akzeptanz und Beteiligung der Gesellschaft notwendig. Deshalb muss durch Vermittlung des Hintergrunds Überzeugungsarbeit geleistet werden. Die Aufklärung sorgt dann - das wäre der Wunsch - ganz von allein und ohne Horror-szenarien für die Einsicht, dass Handeln geboten ist.

Der Aufsatz besteht aus zwei Teilen, die unabhängig voneinander gelesen werden können. Der erste Teil ist eine leicht lesbare Kurzfassung, in der drei Themen besprochen werden, über die man am ehesten stolpert. Der zweite Teil nimmt die Themen des ersten Teils auf - Wiederholungen sind beabsichtigt - und fügt weitere Themen hinzu. Er ist insgesamt tiefer gehend und argumentativ besser abgesichert gegenüber Meinungen, die mehr oder weniger begründet in Umlauf sind und nach Klärung verlangen.

Altenberge, Sept. 2022

Herbert Kroll

Prof. a.D. Dr. Herbert Kroll  
Geo-Museum Zurholt Altenberge e.V.  
Lindenstr. 8  
48341 Altenberge  
<https://www.museum-zurholt.de/>

Umschlagbild  
<https://www.shutterstock.com>

## Teil I

### Das Klima: Der Wandel und die Fragen

#### Die kurze Version

<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>Seite</b>
Die kurze Version	5
Klimawandel in der Vergangenheit	5
Klein, aber oho: Der CO <sub>2</sub> -Gehalt und seine Wirkung	8
Ist der gegenwärtige Klimawandel menschengemacht?	9
Klimamodellrechnungen	9

## Die kurze Version

In der Kurzfassung des Artikels widmen wir uns drei Fragen:

- Was unterscheidet den heutigen Klimawandel von den früheren? Ist er tatsächlich menschengemacht?
- Wie kann es sein, dass der geringe Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>)-Gehalt der Luft - er beträgt nur 0.04%! - überhaupt klimawirksam ist?
- Warum wechseln in der Vergangenheit Kaltzeiten und Warmzeiten miteinander ab, und was bedeutet dies für die Zukunft?

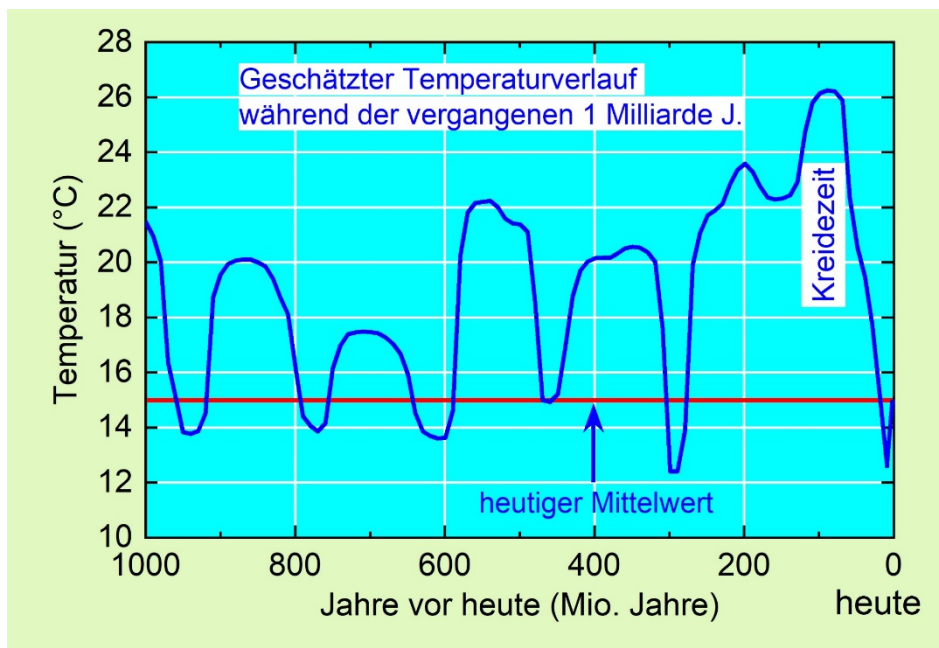
Mit der letzten Frage beginnen wir.

## Klimawandel in der Vergangenheit

Gehen wir einmal tief zurück in die geologische Vergangenheit (1 Milliarde Jahre), dann sehen wir: Klimawandel hat es schon immer gegeben, häufig begleitet von gewaltigen Temperaturänderungen (Abb. 1). Besonders die Kreidezeit, in der im Münsterland der Altenberger Stein und der Baumberger Sandstein gebildet wurden, sticht hervor. Es war im Schnitt 10°C wärmer als heute, der letzte Schneekristall geschmolzen, das Meer auf dem Höchststand, das Münsterland überflutet. In Bochum saßen die Saurier am Meeresstrand in den Liegestühlen und schwitzten. Von ein paar Eiszeitaltern abgesehen war es während der Erdgeschichte durchweg wärmer als heute.

**Abb. 1**

Quelle:  
s. Abb. 7

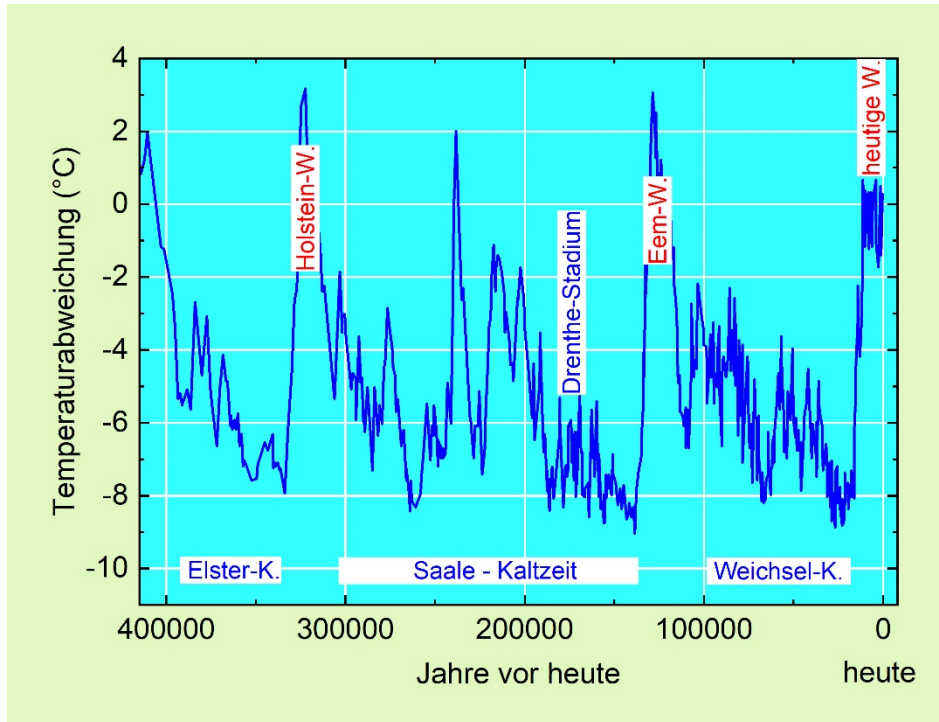


Über die nähere Vergangenheit geben Kernbohrungen in den grönländischen und antarktischen Eisschilden Auskunft. Die Bohrungen erreichten in der Antarktis eine Tiefe von 4 km und förderten Eis zutage, das bis zu 800.000 J. alt ist. Wenn Schnee in Firn und Eis übergeht, werden winzige Luftbläschen eingeschlossen. Die Analyse der Bläschen gibt uns heute Auskunft (1) über die Zusammensetzung der Luft und (2) über die Temperatur der Luft zur Zeit der Eisbildung.

In Abb. 2 sind für die letzten 400.000 Jahre die Abweichungen vom heutigen Temperatur-Mittelwert dargestellt. Man sieht, die Warmzeiten waren ein kurzes Vergnügen; sie dauerten gerade mal ungefähr 10.000 J. Dazwischen lagen lange Kaltzeiten. Altenberge hat es während des Drenthe-Stadiums vor ca. 170.000 J. böse erwischt. Da wurde es von einem 200-300 m mächtigen Gletscher eiskalt überfahren.

**Abb. 2**

Quelle:  
s. Abb. 8



In Abb. 2 machen zwei Beobachtungen stutzig: Erstens liegt angesichts der Kürze der Warmzeiten die Befürchtung nahe, dass unsere jetzige Warmzeit, die bereits vor 11.700 J. begann, bald vorbei sein könnte und der Nachrichtensprecher in Stockholm verkündet: „Der Gletscher macht sich auf den Weg nach Süden“. Zweitens fällt auf, dass die fünf Spitzen der Warmzeiten ungefähr einen Abstand von 100.000 J. einhalten.

Hinter diesen beiden Beobachtungen steckt das Zusammenspiel von drei Erdbahnparametern. Damit ist folgendes gemeint: (1) Die Erde bewegt sich auf einer Ellipsenbahn um die Sonne. Die Bahnform wechselt von fast kreisförmig zu deutlich elliptisch, Rhythmus 100.000 Jahre. (2) Die Erdachse ist gegen die Erdbahn geneigt, mal mehr, mal weniger, Rhythmus 43.000 J. (3) Die Erdachse schlackert (sie präzessiert), Rhythmus 23.000 J.

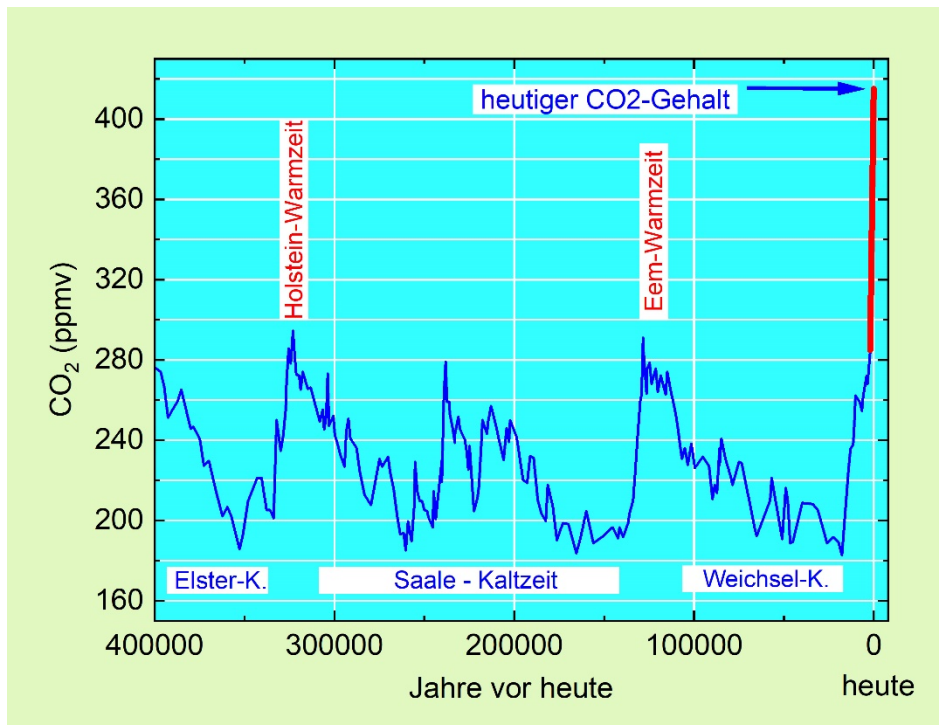
Zusammen kontrollieren diese drei Bahnparameter die mittlere Stärke der Sonneneinstrahlung für jeden Ort auf der Erde. Wenn sie sich in eine Konstellation bewegen, in der im Sommer die Landmassen der Nordhalbkugel viel Sonneneinstrahlung erhalten und deshalb mehr Eis und Schnee schmilzt als im Winter gebildet wurde, geht eine Kaltzeit in eine Warmzeit über, und umgekehrt. Es sind also astronomische Ursachen, die den 100.000-Jahres-Rhythmus vorgeben (sog. Milanković-Zyklen, s. Teil II).

Was nun die Dauer unserer gegenwärtigen Warmzeit angeht, müssen wir uns keine Sorgen machen. Für die nächsten 50.000 J. wird die Erdbahn fast kreisförmig bleiben und dies bedeutet, dass sich unsere Warmzeit fortsetzen wird. Den Stockholmer Nachrichtensprecher müssen wir nicht fürchten.

Bleiben wir noch einen Augenblick bei der Vergangenheit, um die Gegenwart besser zu verstehen. In Abb. 3 ist der CO<sub>2</sub>-Gehalt der Luft, die in den Bläschen im antarktischen Eis konserviert wurde, für die vergangenen 400.000 J. dargestellt. Wir sehen eine verblüffende Übereinstimmung im Verlauf von Temperatur und CO<sub>2</sub>-Gehalt in den Abb. 2 und 3. Das hat seinen Grund. Wenn die Konstellation der Bahnparameter einen Wechsel von Kalt- zu Warmzeit einläutet, dann ist dies zunächst nicht mehr als ein Einläuten. Es müssen Mechanismen hinzutreten, die den Temperaturanstieg verstärken.

**Abb. 3**

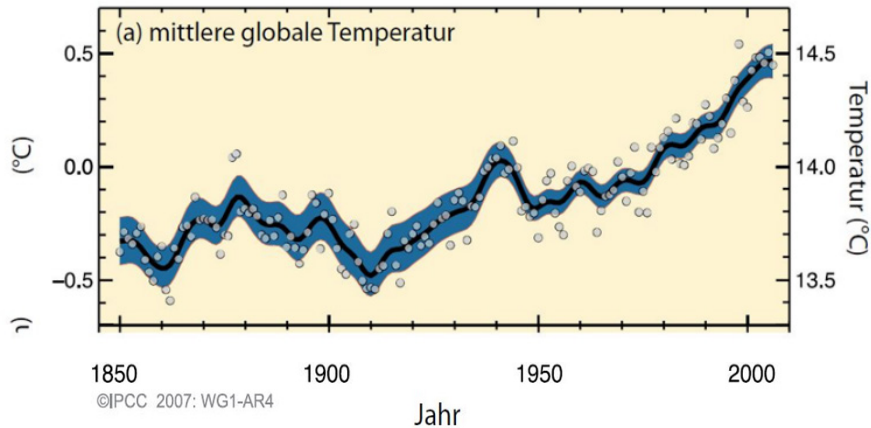
Quelle:  
s. Abb. 9



Und hier kommt zum ersten Mal CO<sub>2</sub> ins Spiel. Bei Erwärmung gibt das Meer CO<sub>2</sub> in die Luft ab, wodurch die Temperatur steigt, so dass weiteres CO<sub>2</sub> aus dem Ozean austritt, usw. Zusätzlich bewirkt die Temperaturerhöhung, dass Eis- und Schneeflächen wegschmelzen und weniger Sonnenstrahlung ins All reflektiert wird. Der Übergang von einer Kaltzeit in eine Warmzeit wird also angestoßen durch astronomische Zyklen und verstärkt durch CO<sub>2</sub>-Entgasung und verminderte Reflexion. Umgekehrt verläuft der Übergang von einer Warmzeit in eine Kaltzeit. Das also steckt hinter dem Rhythmus und den Sprüngen der Temperatur, die wir in Abb. 2 sehen.

Während der letzten 400.000 J. bewegte sich der CO<sub>2</sub>-Gehalt der Luft, wie Abb. 3 zeigt, in einem Korridor zwischen 290 ppmv (Warmzeit) und 180 ppmv (Kaltzeit) – ein kalter Ozean löst relativ viel CO<sub>2</sub>, weshalb in einer Kaltzeit der CO<sub>2</sub>-Gehalt der Luft niedrig ist; umgekehrt ist es in einer Warmzeit. Dieser Korridor wurde 400.000 J. lang niemals verlassen. Erst die menschliche Tätigkeit seit der industriellen Revolution (seit ca. 1850 n. Chr.) lässt den CO<sub>2</sub>-Gehalt auf dieser Skala praktisch senkrecht in die Höhe schießen, auf heute 422 ppmv (rote senkrechte Gerade). Und mit dem CO<sub>2</sub>-Gehalt steigt die Temperatur, wie wir in Abb. 4 sehen.

Abb. 4



### Klein, aber oho: Der CO<sub>2</sub>-Gehalt und seine Wirkung

Angesichts des geringen CO<sub>2</sub>-Gehaltes der Luft – 422 ppmv CO<sub>2</sub> entspricht bescheidenen 0,04% – drängt sich die vollkommen legitime Frage auf: Kann ein solch geringer Gehalt überhaupt klimawirksam sein? Schon der Frage aber liegt ein Denkfehler zugrunde.

Worauf es ankommt, ist nämlich nicht der *relative* CO<sub>2</sub>-Gehalt, sondern die *absolute* Zahl an CO<sub>2</sub>-Molekülen in der Atmosphäre. Das wird sofort klar, wenn wir die Oberflächentemperaturen unserer beiden Nachbarplaneten Mars und Venus miteinander vergleichen: –63°C beim Mars, 464°C bei der Venus. Ein Riesenunterschied, obwohl beide eine fast reine CO<sub>2</sub>-Atmosphäre besitzen! Der Grund ist: Die Mars-Atmosphäre ist dünn, da schwirren nur ein paar CO<sub>2</sub>-Moleküle herum. Die Venus-Atmosphäre ist extrem dicht und enthält entsprechend „unendlich“ viele CO<sub>2</sub>-Moleküle. Es ist also die absolute Zahl der CO<sub>2</sub>-Moleküle maßgebend für die Temperatur, und für die Erde gilt, diese Zahl ist riesig trotz der bescheidenen *relativen* 0,04%. Die Bundesrepublik z. B. produziert pro Jahr knapp 1 Gt CO<sub>2</sub>. Umgerechnet in Anzahl CO<sub>2</sub>-Moleküle ergibt sich eine gewaltige Zahl mit 37 Nullen, nämlich ca.  $1 \cdot 10^{37}$  Moleküle pro Jahr pro Bundesrepublik!

Die Frage ist jetzt: Wie werden diese CO<sub>2</sub>-Moleküle klimawirksam? Die Antwort lautet: Weil sie mit der Wärmestrahlung (=Infrarot-Strahlung), die von der Erdoberfläche radial in Richtung All abgegeben wird, wechselwirken. Jeder Körper gibt Strahlung ab, je heißer, desto kurzwelliger. Die Sonne ist ein heißer Körper: Oberflächentemperatur 5500°C. Sie strahlt im kurzwelligigen Bereich, i. w. im Bereich des sichtbaren Lichtes. Die Erde ist ein kühler Körper: mittlere Oberflächentemperatur 15°C. Sie strahlt im langwelligigen, d. h. im Infrarot-Bereich. Diese Infrarot-Strahlung wird von den CO<sub>2</sub>-Molekülen absorbiert. Die Hauptbestandteile der Luft, Stickstoff und Sauerstoff, absorbieren nicht. Das hat physikalische Gründe (s. Teil II).

Durch die Absorption der Infrarot-Strahlung geraten die CO<sub>2</sub>-Moleküle in energetisch angeregte Schwingungs- und Rotationszustände, in denen sie aber nicht verbleiben. Vielmehr geben sie die aufgenommene Energie sofort wieder als Infrarot-Strahlung ab, und zwar in alle Richtungen, also im Mittel geht die eine Hälfte nach oben ins All, die andere Hälfte nach unten in Richtung Erde. Und damit wärmt zusätzlich zur Sonneneinstrahlung die rückgestrahlte Infrarot-Strahlung die Erde. Man nennt dies den natürlichen Treibhauseffekt. Ohne diese Rückstrahlung, verursacht durch CO<sub>2</sub> und die übrigen Klimagase, wäre die Oberflächentemperatur der Erde um 33°C niedriger. Wir hätten frostige –18°C!

Hier ist er also wieder, der Zusammenhang zwischen CO<sub>2</sub>-Gehalt und Temperatur, den wir oben schon angetroffen haben. Man muss jetzt nur noch Eins und Eins zusammenzählen, um



sich bewusst zu machen, dass jedes zusätzliche CO<sub>2</sub>-Molekül in der Luft ein Molekül zu viel ist, weil es zur Infrarot-Rückstrahlung und damit zum natürlichen Treibhauseffekt beiträgt und die Erdoberfläche erwärmt.

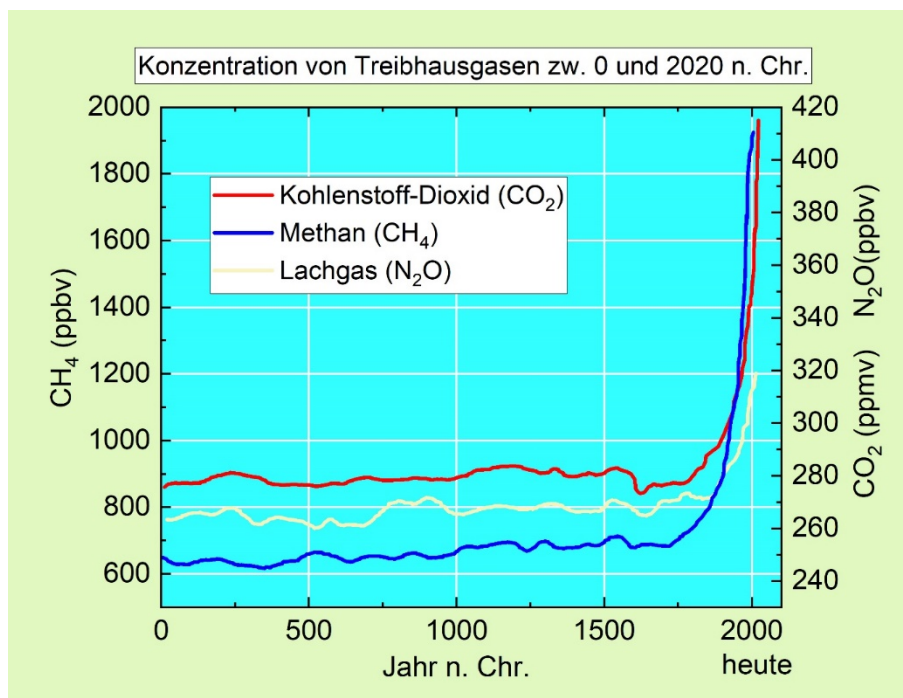
### Ist der gegenwärtige Klimawandel menschengemacht?

Nach dem, was wir bis jetzt gelernt haben, kann die Antwort nur lauten: Na klar. Der senkrechte Anstieg des CO<sub>2</sub>-Gehalts in Abb. 3 übersetzt sich in den Temperaturanstieg in Abb. 4. Natürlich gab es in der geschichtlichen Vergangenheit Klimaschwankungen. Wir hatten Warmphasen zur Römerzeit und im Spätmittelalter, bevor es mit der Temperatur herunterging in die sog. Kleine Eiszeit. Und jetzt kommen wir halt in eine kleine Warmzeit; das sind alles natürliche Schwankungen. Könnte man denken.

Nein, denn den Anstieg der klimawirksamen Gase beobachten wir erst mit dem Beginn der industriellen Revolution, also seit ca. 1850 n. Chr. (Abb. 5). Wie aber die Klimagase durch Absorption (=Energieaufnahme) und Emission (=Energieabgabe) der von der Erde abgehenden Infrarot-Strahlung die Temperatur kontrollieren, haben wir gesehen. Man kommt also aus physikalischen Gründen gar nicht darum herum festzustellen, dass der gegenwärtige Klimawandel menschengemacht ist.

**Abb. 5**

Quelle:  
s. Abb. 12



### Klimamodellrechnungen

Klimamodellrechnungen zeigen, dass sich der beobachtete Temperaturanstieg nicht auf natürliche Ursachen (Schwankungen der Sonneneinstrahlung, vulkanische Ereignisse) zurückführen lässt. Ohne den Anstieg der Klimagase einzubeziehen, ist keine Übereinstimmung zwischen Beobachtung und Modellierung zu erzielen.

**Zum Schluss sei angemerkt:** Wer skeptisch auf Klimamodellrechnungen blickt, betrachte in **Teil II** die brillante Voraussage der Entwicklung des CO<sub>2</sub>-Gehalts und der Temperatur, die Wissenschaftler des EXXON-Konzerns bereits 1982 (!) vorgelegt haben. Was der Konzern der Öffentlichkeit natürlich verschwiegen hat.

## Teil II

### Das Klima: Der Wandel und die Fragen

#### Die ausführliche Version

Inhaltsverzeichnis	Seite
Themenfolge	11
Einleitung	12
Der natürliche Treibhauseffekt	12
Venus, Mars und Erde	13
Wie wechselwirken Infrarot (IR)-Strahlung und Kohlenstoffdioxid (CO <sub>2</sub> )-Moleküle?	14
Ist die Atmosphäre an CO <sub>2</sub> gesättigt oder ist sie nicht gesättigt?	17
Das Klimagas Wasserdampf	19
Klimawandel gab es schon immer	20
Temperaturen in der Vergangenheit	20
Atmosphärische CO <sub>2</sub> -Gehalte in der Vergangenheit	22
Das Eis und die Temperatur	22
Wodurch werden die Klimawechsel angestoßen? Die Milanković-Theorie	25
Beispiele	25
Rückkopplungen	27
Der Zeitverzug zwischen Temperatur- und CO <sub>2</sub> -Anstieg	28
Die jüngere Klima-Vergangenheit	28
Modellrechnungen: Der Anstieg – menschengemacht oder natürlich?	30
Konsonanzen und Dissonanzen	31
Die atmosphärische Gegenstrahlung	31
EIKE	32
Der EXXON-Konzern	33
Literaturverzeichnis	35
Nützliche WEB-Sites zum Thema	36
Referenzen	37

## Themenfolge

Bei der gesamten Diskussion um den Klimawandel ist es im Grunde verblüffend, dass sich die ganze Aufmerksamkeit auf ein einziges Gas, CO<sub>2</sub>, fokussiert, das an der Luft nur einen verschwindend geringen Anteil hat. In einem Leserbrief in den „Westfälischen Nachrichten“ vom 20.12.2019 hieß es: „Man muss nicht einmal die Gesetze der Thermodynamik bemühen, um zu verstehen, dass dieser geringe Anteil von CO<sub>2</sub> in der Luft niemals – weder durch Wärmeleitung, noch Wärmestrahlung, noch Konvektion – die Lufthülle messbar erwärmen kann...“.

Das klingt ganz und gar plausibel, dennoch hat der Leserbriefschreiber unrecht. Um dies zu verstehen, entwickeln wir zunächst das Konzept des natürlichen Treibhauseffekts. Wir klären, wie man sich die Wechselwirkung zwischen Wärmestrahlung der Erde und CO<sub>2</sub>-Molekülen, also den Vorgang von Strahlungsabsorption und Strahlungsemission vorstellen muss. Dazu beschreiben wir das Schwingungsverhalten der Moleküle und stellen das zugehörige Absorptionsspektrum vor. Dieses hilft uns nicht nur, die Wechselwirkung zu verstehen, es hilft uns auch, mit einem Argument umzugehen, welches dem des Leserbriefschreibers entgegengesetzt ist und lautet: „Es ist nicht *zu wenig* CO<sub>2</sub> in der Luft, vielmehr war schon vor dem Industriezeitalter *so viel* CO<sub>2</sub> vorhanden, dass die heutige weitere Zunahme nicht mehr klimawirksam sein kann.“

Beide diametral entgegengesetzten Meinungen sind im Umlauf, verwirren und bedürfen der Klärung.

Um den menschengemachten Klimawandel zu verstehen, ist es nützlich, einen Blick in die geologische Vergangenheit zu werfen. In den letzten 400.000 J. wechselten sich Kalt- und Warmzeiten in einem Rhythmus von etwa 100.000 J. ab. Diesen Rhythmus stoßen astronomische Zyklen an (Milanković-Zyklen), welche die solare Einstrahlung beeinflussen. Wir veranschaulichen die wechselnden Konstellationen der Erdbahnparameter und machen ihre Dynamik sichtbar.

In den vergangenen dreißig Jahren ist eine Reihe von Kernbohrungen durch die grönländischen und antarktischen Eisschilde niedergebracht worden. Über den CO<sub>2</sub>-Gehalt der Luft geben eingeschlossene Luftbläschen im Eis Auskunft, und die damaligen Temperaturen verrät die (isotopische) Zusammensetzung des Eises selbst.

Vor ca. 19.000 J. endete die letzte Kaltzeit. Über einen Zeitraum von 8000 J. ging sie in die heutige Warmzeit über. Der Temperaturanstieg vor 19.000 J. wurde angestoßen durch das Ende eines Milanković-Zyklus, in dessen Folge der CO<sub>2</sub>-Gehalt stieg, weil der wärmere Ozean CO<sub>2</sub> entgaste. Damit verglichen ist die heutige Situation eine ganz andere. Heute ist es die menschliche Tätigkeit, die den CO<sub>2</sub>-Gehalt steigen lässt und über den natürlichen Treibhauseffekt die Temperatur erhöht.

Der parallele Anstieg von CO<sub>2</sub> und Temperatur wurde schon 1982 durch eine Klimamodellrechnung vorhergesagt, die Wissenschaftler – ausgerechnet – des EXXON-Konzerns durchführten. Die Ergebnisse wurden verschwiegen, Klimaskeptiker ignorieren sie. Das letzte Kapitel ist ihnen gewidmet.

## Einleitung

Die spontane Reaktion: „Wird uns beim Thema Klimawandel nicht etwas vorgemacht?“ ist unausweichlich, wenn der geringe CO<sub>2</sub>-Gehalt der Atmosphäre, der am Wandel schuld sein soll, bewusst wird. Die Luft enthält gegenwärtig 422 ppmv Kohlenstoffdioxid, CO<sub>2</sub>. 422 ppmv CO<sub>2</sub> entsprechen 422 cm<sup>3</sup> CO<sub>2</sub> in 1 m<sup>3</sup> Luft. Das sind also magere 0.042%. Wir können dies anschaulich machen: Wir stellen uns 1 m<sup>3</sup> Luft vor und sammeln das darin enthaltene CO<sub>2</sub> in einen Würfel; dann hat dieser Würfel eine Kantenlänge von 7,4 cm. Mehr nicht. In der vorindustriellen Zeit, also vor 1850 n. Chr., waren 285 ppmv CO<sub>2</sub> in der Luft, also 0.028%, oder so viel wie in einen Würfel von 6.6 cm Kantenlänge passt. Der ganze, in der industriellen Neuzeit verursachte Anstieg beträgt also gerade mal 0.013 Prozentpunkte, entsprechend der Vergrößerung unseres Würfels um nur 8 mm Kantenlänge!

Da fragt man sich natürlich: es sind nur 0.04% CO<sub>2</sub> in der Luft und der Anstieg, um den so viel Lärm gemacht wird, beträgt ganze 0.01 Prozentpunkte. Deshalb sollen Kohlekraftwerke abgeschaltet und die ganze Industrie umgebaut werden? Sträubt sich da nicht der gesunde Menschenverstand?

Klären wir also, wie CO<sub>2</sub>, das zunächst stellvertretend für den Rest der Klimagase - Wasserdampf H<sub>2</sub>O (das wichtigste Klimagas), Methan CH<sub>4</sub>, Lachgas N<sub>2</sub>O etc. - stehen möge, überhaupt wirksam wird.

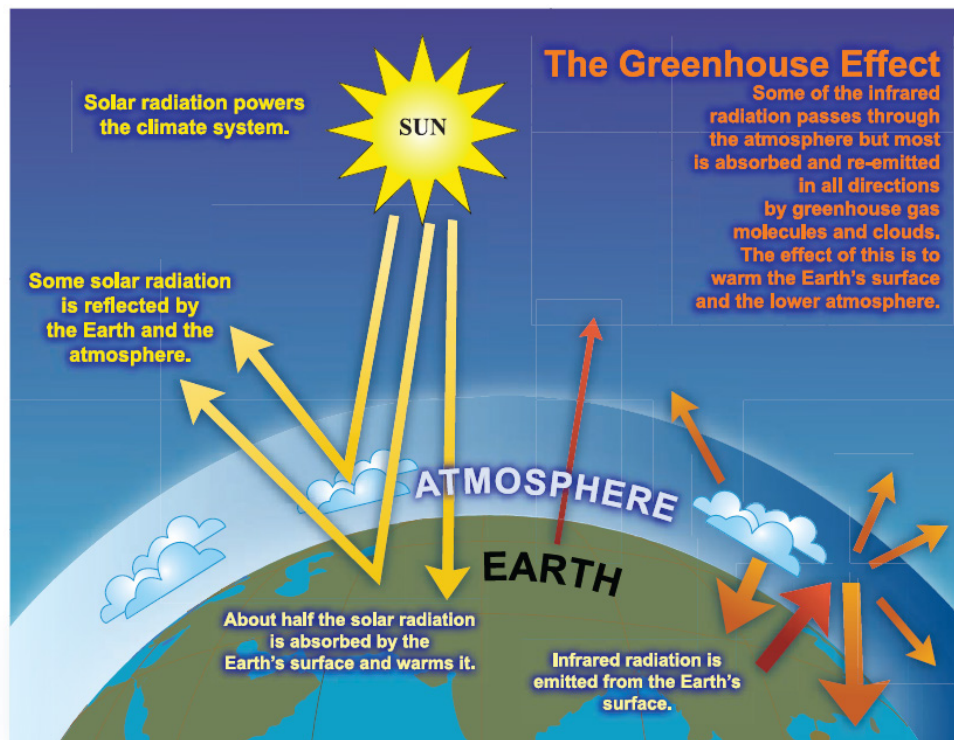
## Der natürliche Treibhauseffekt

Woher bezieht die Erdoberfläche ihre Energie? Von der Sonne. Die Energie, die aus dem Erdinneren stammt, ist vernachlässigbar (die Erdkruste ist ein guter Isolator).

Die Sonne ist ein heißer Körper; ihre Oberflächentemperatur beträgt ca. 5500°C. Die Physik (in Gestalt des Strahlungsgesetzes von Max Planck) sagt uns: Je heißer ein Körper, desto kurzwelliger seine (elektromagnetische) Strahlung. Die Sonne strahlt vom ultravioletten bis in den infraroten Wellenlängenbereich (i. w. zwischen 0,2 µm, ultraviolett, bis 3 µm, infrarot). Zwischen 0,4 µm und 0,8 µm liegen die Wellenlängen des sichtbaren Lichtes.

Verglichen mit der Sonne ist die Erde ein kühler Körper; die gegenwärtige globale Oberflächentemperatur beträgt 15°C. Entsprechend langwellig ist die Strahlung, welche die Erde radial ins All aussendet: sie liegt im Infrarot (IR)-Bereich, i. w. zwischen 3 µm und 30 µm. Abbildung 1 ist eine anschauliche Skizze.

Kurzwellige Sonnenstrahlung trifft auf die Erde, langwellige IR-Strahlung verlässt sie. Aber bevor die IR-Strahlung ins All verschwindet, wird ihr überwiegender Teil von den Molekülen der Klimagase absorbiert. Durch die Aufnahme der Energiequanten (Photonen) der IR-Strahlung geraten die Moleküle in sog. angeregte Schwingungs- und Rotationszustände, in denen sie aber nur kurzzeitig verharren. Dann emittieren sie die gerade aufgenommenen Energiequanten wieder, und zwar in alle möglichen Richtungen, im Mittel geht die eine Hälfte in den Halbraum nach oben, in Richtung All, die andere Hälfte in den Halbraum nach unten, in Richtung Erde, und da es sich um IR-Strahlung, also Wärmestrahlung handelt, wird die Erdoberfläche durch diese Rückstrahlung erwärmt, und zwar nicht wenig. Die Physik – dieses Mal in Gestalt der Stefan-Boltzmann-Gleichung angewandt auf ein vereinfachtes Modell der Erde und ihrer Atmosphäre – sagt uns: Wenn wir annehmen, dass die Klimagase sich verhalten wie Sauerstoff und Stickstoff, also IR-Strahlung *nicht* absorbieren, sondern



**Abb. 1:** Der natürliche Treibhaus-Effekt (IPCC, 2007: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. FAQ 1.3)

durchlassen, dann würden auf der Erde unangenehme  $-18^{\circ}\text{C}$  herrschen statt der gegenwärtigen angenehmen  $+15^{\circ}\text{C}$ !

Den wärmenden Rückstrahleffekt bezeichnet die Physik als den natürlichen Treibhauseffekt (atmosphärische Gegenstrahlung).

Der natürliche Treibhauseffekt bewirkt also eine Temperaturerhöhung von  $33^{\circ}\text{C}$ . Wie kann dies sein?

Als erstes müssen wir uns von dem irreführenden Eindruck befreien, den die kleine Zahl  $0,04\%$  auf uns macht. Diese Zahl gibt nur den *relativen* Anteil an  $\text{CO}_2$  in der Atmosphäre an. Entscheidend für die Wechselwirkung zwischen IR-Strahlung und  $\text{CO}_2$  ist aber natürlich nicht die *relative*, sondern die *absolute* Zahl an  $\text{CO}_2$ -Molekülen. Die Bundesrepublik Deutschland produziert pro Jahr etwas weniger als  $1 \text{ Gt CO}_2$ , umgerechnet in die Anzahl von  $\text{CO}_2$ -Molekülen ergibt sich die riesige Zahl von  $1 \cdot 10^{37}$  Molekülen pro Jahr pro Bundesrepublik. Das ist eine Zahl mit 37 Nullen. Es stehen also wahrlich genügend  $\text{CO}_2$ -Moleküle in Lauerstellung, um IR-Strahlung zu absorbieren und anschließend zu emittieren.

### Venus, Mars und Erde

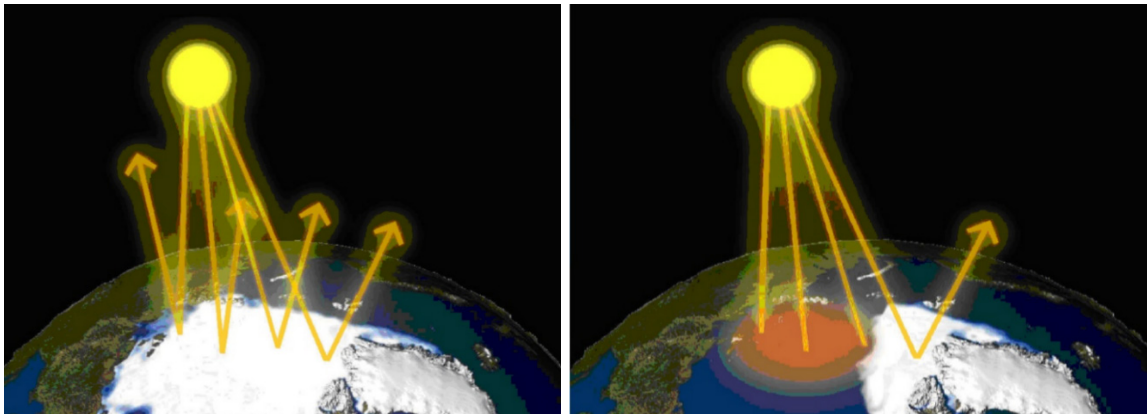
Die mittlere treibhausfreie Oberflächentemperatur der Erde haben wir mit  $-18^{\circ}\text{C}$  berechnet. Die entsprechenden Näherungstemperaturen für unsere Nachbarplaneten Venus und Mars stehen in der folgenden Tabelle; unterschiedlicher Abstand zur Sonne und unterschiedliche Albedo (=Anteil des an Wolken, Eisflächen etc. reflektierten Sonnenlichts, Abb. 2) sind bei der Berechnung berücksichtigt.

**Tabelle 1:** Berechnete und beobachtete Oberflächentemperaturen der Planeten Venus, Erde und Mars.

	<i>Abstand zur Sonne</i>	<i>Albedo</i>	<i>berech. Temp.</i>	<i>beob. Temp.</i>
<i>Venus</i>	<i>108.000.000 km</i>	<i>0,77</i>	<i>-46 °C</i>	<i>464 °C</i>
<i>Erde</i>	<i>150.000.000 km</i>	<i>0,30</i>	<i>-18 °C</i>	<i>15 °C</i>
<i>Mars</i>	<i>228.000.000 km</i>	<i>0,25</i>	<i>-63 °C</i>	<i>-63 °C</i>

Venus und Mars besitzen beide eine Atmosphäre aus fast reinem CO<sub>2</sub> (96% CO<sub>2</sub>). Wenn nun der relative CO<sub>2</sub>-Gehalt der Atmosphäre für die Oberflächentemperatur maßgebend wäre, müssten beide sehr viel heißer sein als die Erde. Mars hat aber nur eine mittlere Temperatur von -63°C. Venus hingegen ist glühend heiß, 464°C. Des Rätsels Lösung liegt in der Dichte ihrer Atmosphären: nur 6 hPa auf dem Mars, dagegen 95.000 hPa auf der Venus. In der Mars-Atmosphäre sind so wenige CO<sub>2</sub>-Moleküle enthalten, dass sich kein merklicher Treibhauseffekt entwickeln kann, im starken Gegensatz zur Venus.

Der Vergleich Venus – Erde – Mars macht also klar: es ist nicht der relative CO<sub>2</sub>-Gehalt, der wichtig ist für die Oberflächentemperatur, sondern die absolute Zahl der CO<sub>2</sub>-Moleküle in der Atmosphäre (was ja eigentlich auch unmittelbar einleuchtet).



**Abb. 2:** Albedo = Verhältnis von rückgestrahltem zu einfallendem Licht. Im linken Bild ist die Albedo hoch, im rechten ist sie niedrig (Dieter Kasang, Wikipedia: Eis-Albedo-Rückkopplung, CC BY-SA 3.0)

### Wie wechselwirken Infrarot (IR)-Strahlung und Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>)-Moleküle?

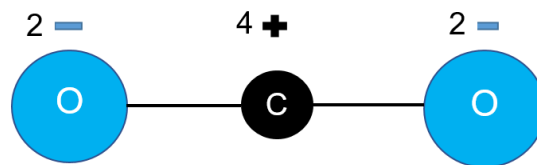
Das Verständnis des natürlichen Treibhauseffekts ist grundlegend für die Diskussion des Klimawandels. Deshalb müssen wir uns jetzt Gedanken darüber machen, was Absorption und Emission von IR-Strahlung bedeuten. Saugt CO<sub>2</sub> die IR-Strahlung auf wie ein Schwamm das Wasser und bleibt sie dort für ewig und drei Tage oder wird sie wieder abgegeben, und wenn ja, wann? Und warum beteiligen sich nicht die beiden Hauptbestandteile der Luft, 79% Stickstoff (N<sub>2</sub>) und 20% Sauerstoff (O<sub>2</sub>), an der Absorption, sondern stehen vornehm beiseite?

Wir veranschaulichen uns zuerst das energetische Geschehen zwischen den Molekülen der Luft: Erstens, sie bewegen sich mit rasender Geschwindigkeit: ca. 0.5 km/sec! Zweitens, sie ballern dauernd gegeneinander, pro Sekunde erlebt ein Molekül ca. 3 Milliarden Zusammenstöße mit seinen Nachbarn!

Unter den Molekülen herrscht also die reinste Massenschlägerei. Bei den Zusammenstößen wird Energie ausgetauscht: die drei Energiearten Bewegungs-, Rotations- und Schwingungsenergie werden dabei gleichverteilt.

Uns interessiert vor allem das Rotations- und Schwingungsverhalten, weil sich hier die IR-Absorption abspielt. Das sei am Beispiel des CO<sub>2</sub>-Moleküls erläutert (Abb. 3).

Ein Molekül besteht allgemein aus zwei oder mehr Atomen. CO<sub>2</sub> ist ein lineares Molekül. Es ist als Ganzes elektrisch neutral. Das C-Atom selbst ist positiv, die O-Atome sind negativ geladen. Wichtig ist, dass in Ruhe der Schwerpunkt der negativen Ladungen mit der positiven Ladung zusammenfällt. Das Molekül hat also keinen permanenten Dipol.



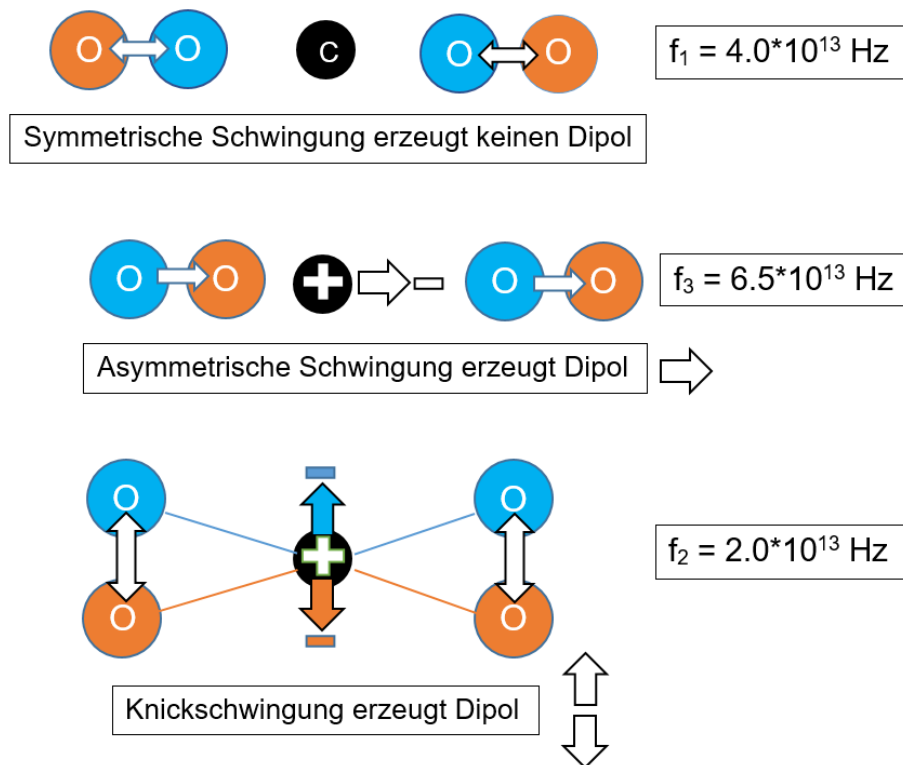
**Abb. 3:** Skizze des linearen CO<sub>2</sub>-Moleküls. Das C-Atom ist formal 4-fach positiv geladen, die beiden O-Atome sind je 2-fach negativ geladen. Die Ladungen fallen im C-Atom zusammen.

Das CO<sub>2</sub>-Molekül besitzt drei verschiedene charakteristische Schwingungsarten („Eigenschwingungen“) (Abb. 4):

(1) eine *symmetrische* Schwingung, bei der beide O-Atome gleichzeitig auf das C-Atom hinschwingen und von ihm wegschwingen. Es entsteht kein Dipol. Die positive C-Ladung fällt während der Schwingung immer mit dem Schwerpunkt der negativen O-Ladungen zusammen.

(2) eine *asymmetrische* Schwingung, bei der beide O-Atome gleichzeitig nach rechts oder links schwingen. Es entsteht ein Dipol. In der Skizze der Abb. 4 bewegt sich der Schwerpunkt der beiden negativen O-Ladungen nach rechts vom C-Atom weg. Der breite weiße Pfeil markiert den Dipol.

(3) eine *Knick*-Schwingung, bei der beide O-Atome gleichzeitig nach oben und unten bzw. senkrecht aus dem Bild herausschwingen („zweifach entartete Schwingung“ heißt es in der Physiker-Sprache). Es entsteht wiederum ein Dipol. Der Schwerpunkt der negativen O-Ladungen wandert nach oben und unten. Die beiden breiten Pfeile markieren den Dipol. Der Dipol schwingt aus einer „Oben-Position“ durch null in eine „Unten-Position“ und zurück, und zwar mit einer ganz bestimmten, für diese Schwingung charakteristischen Frequenz von  $2.0 \cdot 10^{13}$  Hz.



**Abb. 4:** Die drei voneinander unabhängigen Schwingungsarten des  $\text{CO}_2$ -Moleküls. Die Schwingungsfrequenzen  $f$  sind in Hz angegeben ( $1 \text{ Hz} = 1$  Schwingung pro Sekunde). Das Molekül führt also z. B. 20 Billionen Knickschwingungen pro Sekunde aus (und wird dabei nicht müde) (nach Haken und Wolf, 2006, Abb. 10.10)

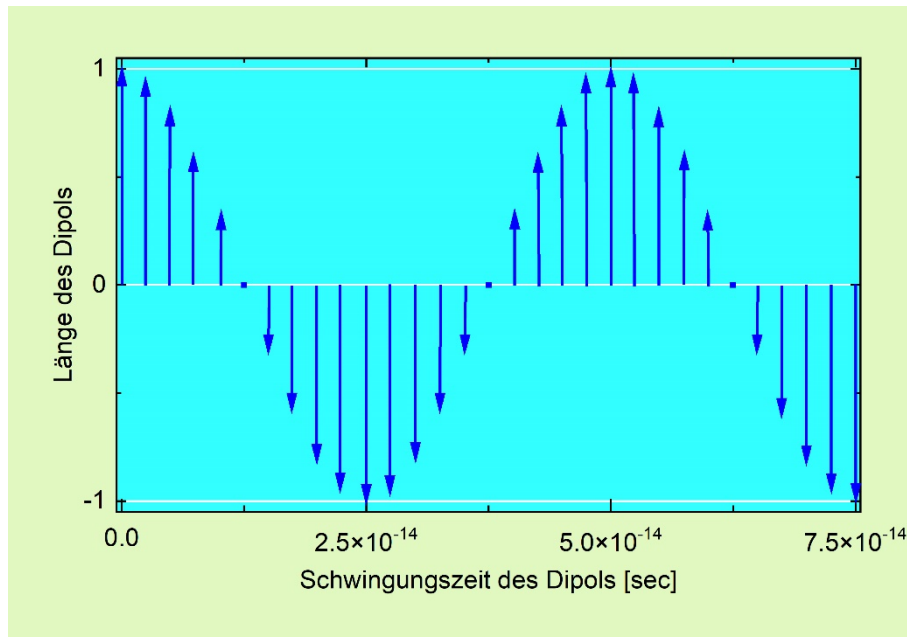
Abb. 5 zeigt am Beispiel der Knickschwingung, wie sich Länge und Richtung des Dipols zeitlich verändern. Sie tun dies in einer wellenförmigen Bewegung.

Der Knackpunkt ist jetzt: Wenn eine IR-Welle, die genau dieselbe Schwingungsfrequenz besitzt wie der Dipol der Knickschwingung ( $2,0 \cdot 10^{13} \text{ Hz}$ ), ein  $\text{CO}_2$ -Molekül trifft, dann und nur dann wird das Energie-Quantum dieser Welle vom Molekül absorbiert und das Molekül antwortet mit einer vergrößerten Schwingungsamplitude (angeregter Schwingungszustand).

In grober, eigentlich schon verbotener, aber anschaulicher Analogie stellen wir uns eine frei schwebende Brücke vor, rechts und links liege sie auf den Aufliegern. Jetzt drücken wir mit unserem „starken Finger“ die Brücke nach unten und lassen los. Dann schwingt die Brücke vor sich hin, mit einer charakteristischen Frequenz (entsprechend der Knickschwingung des Moleküls). Wenn wir jetzt die Frequenz der Brückenschwingung genau abpassen und immer dann, wenn die Brücke oben ist, mit dem starken Finger draufdrücken, vergrößern wir durch die zugeführte Energie die Schwingungsamplitude.

Die Brücke würde weiter vor sich hinschwingen. Das Molekül tut es nicht, sondern emittiert das absorbierte Energie-Quantum sofort, und zwar in eine beliebige Richtung, mit der Wahrscheinlichkeit  $\frac{1}{2}$  in Richtung All, mit der Wahrscheinlichkeit  $\frac{1}{2}$  in Richtung Erde. Das ist die oben erwähnte atmosphärische Gegenstrahlung, welche die Erdoberfläche zusätzlich zur Sonneneinstrahlung erwärmt und den sog. natürlichen Treibhauseffekt ausmacht.





**Abb. 5:** Der Dipol der Knickschwingung hat zum Zeitpunkt 0 (links) seine maximale positive Auslenkung (blauer Pfeil in Abb. 4), er wird kleiner, geht nach  $1,25 \times 10^{-14}$  sec durch null, erreicht nach  $2,5 \times 10^{-14}$  sec seine maximale negative Auslenkung (roter Pfeil in Abb. 4 unten), wird dann wieder größer usw.

**Und jetzt darf man dreimal raten, was geschieht, wenn die Menschheit nicht aufhört, weiterhin CO<sub>2</sub> in das System Erde-Atmosphäre zu pumpen: die Gegenstrahlung wird zunehmen, die Temperatur wird steigen.**

Die Physik und die Klimatologie diskutieren nicht die Existenz der atmosphärischen Gegenstrahlung, die ist Fakt, sondern diskutiert wird die sog. Klimasensitivität, womit gemeint ist: Um wieviel Grad wird die Temperatur steigen, wenn der CO<sub>2</sub>-Gehalt der Atmosphäre sich verdoppelt, also vom vorindustriellen Wert von 285 ppmv auf 570 ppmv ansteigt. Diese Rechnungen sind alles andere als trivial, weil eine Vielzahl von positiven und negativen Rückkopplungen zu berücksichtigen ist, die wir bei der Komplexität des Klimasystems vielleicht nie ganz überblicken werden. Die verschiedenen Klimamodelle beschäftigen sich mit diesem Thema. Auf *ein* Modellergebnis, das ausgerechnet Wissenschaftler des Ölkonzerns EXXON ihren Chefs vertraulich mitgeteilt haben – aber was bleibt schon vertraulich –, werden wir unten zurückkommen.

### **Ist die Atmosphäre an CO<sub>2</sub> gesättigt oder ist sie nicht gesättigt?**

Im Gegensatz zu der Meinung, es gäbe zu wenig CO<sub>2</sub> in der Atmosphäre, um überhaupt einen Temperatureffekt zu bewirken, gibt es auch die gegenteilige Position, die argumentiert: Es ist nicht zu wenig CO<sub>2</sub>, sondern umgekehrt, schon vorindustriell, also vor 1850 n. Chr., war so viel CO<sub>2</sub> in der Atmosphäre, dass ein Mehr überhaupt keinen Effekt haben kann. Die Atmosphäre war bereits gesättigt, d. h. wir können zusätzlich so viel CO<sub>2</sub> in die Luft pusten wie wir lustig sind, ohne dass die Temperatur steigt.

Um dieses Argument zu betrachten, sehen wir uns an, wie ein Absorptionsspektrum von  $\text{CO}_2$  aussieht. Experimentell gewinnt man es, indem man IR-Strahlung durch eine Säule von  $\text{CO}_2$ -Gas hindurchschickt und am Ende misst, welche Wellenlängen wie stark absorbiert werden.

Beide Spektren in Abb. 6 sind Zacken-Diagramme. Der zentrale Peak im oberen Diagramm entspricht der Energieaufnahme (Absorption) von IR-Strahlung durch die Knickschwingung mit der Frequenz  $2.0 \cdot 10^{13}$  Hz bzw. der Wellenlänge  $15 \mu\text{m}$  (Abb. 4c). Die Zacken rechts und links davon entsprechen der Absorption durch Rotation. Das  $\text{CO}_2$ -Molekül führt nämlich nicht nur eine Knickschwingung durch, sondern rotiert gleichzeitig in energetisch sauber voneinander getrennten Niveaus (wir erinnern uns: im atomaren Bereich wird Energie nicht kontinuierlich, sondern nur in diskreten Quanten aufgenommen, daher die Zacken mit ihren gleichmäßigen Abständen).

In Abb. 6 (unten) sehen wir das Absorptionsspektrum, das durch die Anregung der asymmetrischen Streckschwingung entsteht (Abb. 4b). Der Zentralpeak fehlt aus Gründen, die wegen ihrer Komplexität uns hier nicht kümmern. Rechts und links liegen wieder die diskreten Absorptionslinien, die durch die gequantelte Anregung der Vielzahl von kombinierten Rotations-Schwingungsniveaus entstehen.

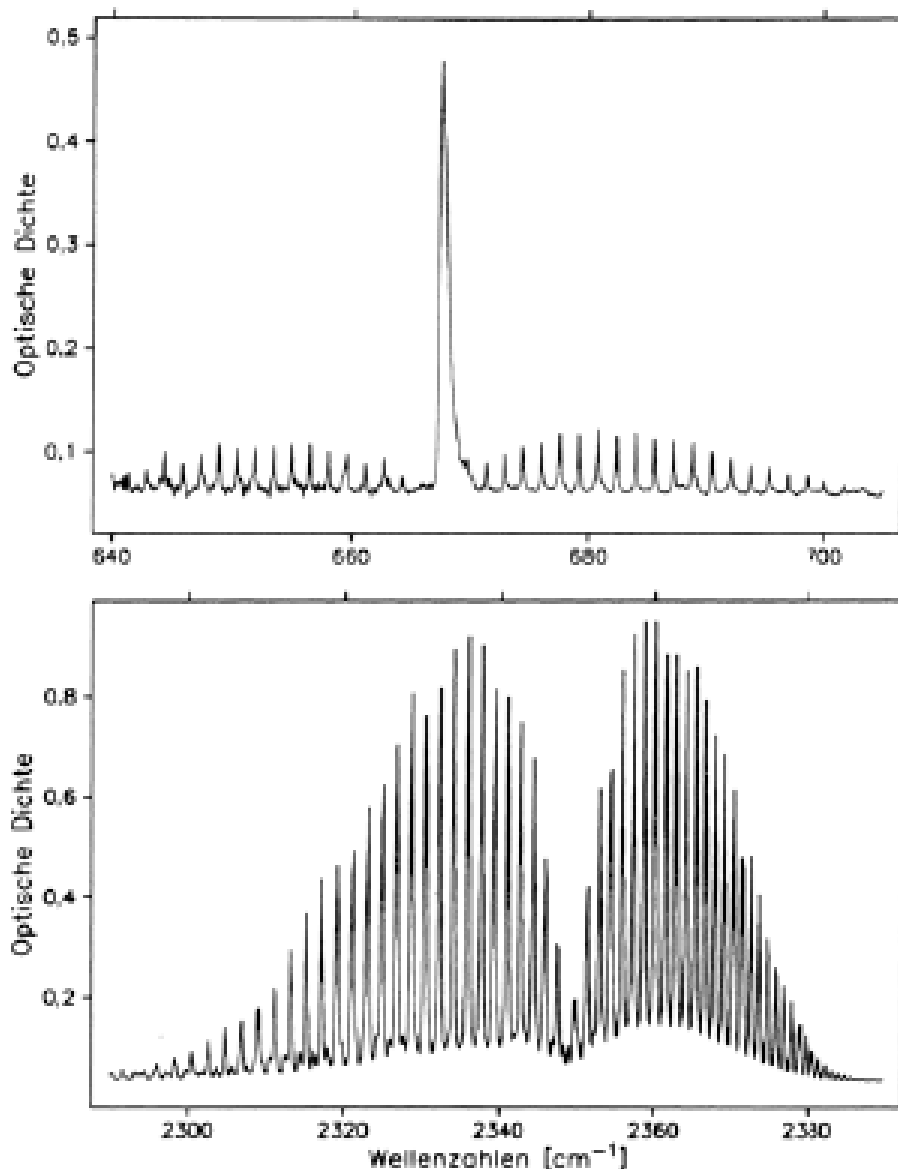
Betrachten wir jetzt noch einmal die Abb. 6 (oben). Im zentralen Bereich, wo der hohe Peak liegt (bei  $667 \text{ cm}^{-1}$  bzw.  $15 \mu\text{m}$ ), wird IR-Strahlung durch die  $\text{CO}_2$ -Moleküle, die bereits in der Luft sind, stark absorbiert. Zusätzliche  $\text{CO}_2$ -Moleküle gingen sozusagen leer aus, die  $15 \mu\text{m}$ -Strahlung wäre durch die bereits vorhandenen Moleküle wegabsorbiert, d. h. Sättigung ist erreicht. Aber rechts und links vom Zentralpeak wird IR-Strahlung nur wenig absorbiert, so dass diese Wellenlängenbereiche, die über das Diagramm hinaus noch weit nach rechts und links reichen, von einer Sättigung weit entfernt sind (Kiehl und Trenberth, 1997; Hoffmann, 2009). Hier kann also zusätzliches  $\text{CO}_2$  wirksam werden und die IR-Strahlung absorbieren und emittieren, und der so erhöhte Treibhauseffekt wird die Erdoberfläche weiter erwärmen.

Sowohl die Meinung „zu wenig  $\text{CO}_2$ “ als auch die Meinung „zu viel  $\text{CO}_2$ “ steht im Konflikt mit der physikalischen Realität.

In Abb. 6 scheint ein Diagramm zu fehlen: das der symmetrischen Streckschwingung (Abb. 4a). Wir wissen, warum: Die symmetrische Schwingung erzeugt keinen Dipol, mit dem IR-Strahlung wechselwirken könnte. Also findet keine IR-Absorption statt.

Und aus eben diesem schlichten Grund absorbieren auch die Stickstoff- und Sauerstoff-Moleküle der Luft keine IR-Strahlung; sie können nur symmetrisch schwingen, also entsteht kein Dipol, und deshalb sind Stickstoff- und Sauerstoff-Moleküle, wie es heißt, IR-inaktiv. Sie lassen die von der Erde ausgesandte IR-Strahlung ungerührt passieren, sie stehen vornehm beiseite. Es sind nur die relativ geringfügigen Anteile der Klimagase, die den natürlichen Treibhauseffekt verantworten. Ihr *relativer* Anteil ist gering, aber ihre *absolute* Zahl ist gewaltig, wir haben sie oben ausgerechnet. Sie alle, Wasserdampf  $\text{H}_2\text{O}$ , Kohlenstoffdioxid  $\text{CO}_2$ , Methan  $\text{CH}_4$ , Lachgas  $\text{N}_2\text{O}$  etc. besitzen einen permanent oder temporär schwingenden Dipol und absorbieren und emittieren IR-Strahlung entsprechend der erlaubten Rotations- und Schwingungsfrequenzen ihrer Dipole.

**Eines sollte klar sein: Wenn bereits die geringen Klimagas-Konzentrationen von  $<0,1\%$  eine atmosphärische Gegenstrahlung erzeugen, die einen Temperaturanstieg von  $-18^\circ\text{C}$  auf  $+15^\circ\text{C}$  bewirkt, dann sollte die Menschheit es besser bleiben lassen, an diesen Konzentrationen noch weiter zu drehen.**



**Abb. 6:** CO<sub>2</sub>-Schwingungsspektren, oben: Bande der Knickschwingung, unten: Bande der asymmetrischen Streckschwingung. Optische Dichte = Maß für die Absorption (optische Dichte = 1: vollständige Absorption). Wellenlänge in  $\mu\text{m} = 10000/\text{Wellenzahl}$  in cm. Der zentrale Peak der Knickschwingung oben liegt bei  $667\text{ cm}^{-1}$  bzw.  $15\mu\text{m}$ . (Haken und Wolf, 2006, Abb. 10.12)

### Das Klimagas Wasserdampf

Wir haben zu Anfang Wasserdampf (H<sub>2</sub>O) als das wichtigste Klimagas bezeichnet. Es kann in der Tat IR-Strahlung über große Wellenlängenbereiche absorbieren und wieder emittieren und ist verglichen mit CO<sub>2</sub> etwa dreimal so effektiv. Warum kaprizieren wir uns also so sehr auf CO<sub>2</sub> und nicht auf H<sub>2</sub>O?

Der Grund dafür ist, dass andere Klimagase, vornehmlich CO<sub>2</sub>, dafür sorgen, dass H<sub>2</sub>O überhaupt in der Atmosphäre ist. Würden wir CO<sub>2</sub> u. Co. aus der Atmosphäre entfernen, würde der Treibhauseffekt nachlassen, die Temperatur sinken, Wasserdampf würde kondensieren und als Klimagas verschwinden, die Temperatur weiter fallen und in einen galoppierenden

Verlust des Treibhauseffekts münden, der die Erde in einen gefrorenen Zustand versetzen würde. Wir haben es oben ausgerechnet, frostige  $-18^{\circ}\text{C}$ .

Es sind  $\text{CO}_2$  u. Co., die dafür sorgen, dass die Atmosphäre eine Temperaturstruktur hat, welche die Menge an atmosphärischem Wasserdampf bestimmt. Sinkt die Temperatur, kondensiert Wasserdampf, steigt sie, wird mehr Wasserdampf aufgenommen. Die *direkte* Beeinflussung der Wasserdampf-Menge durch den Menschen ist vernachlässigbar. Aber drehen wir an der Stellschraube  $\text{CO}_2$  und erhöhen die Temperatur, steigt die Wasserdampf-Menge *indirekt* und verstärkt über die starke und schnelle Rückkopplung jede initiale Temperaturstörung um den Faktor 2 bis 3. Die Wasserdampf-Menge, welche die Luft halten kann, richtet sich nach der Temperatur und diese richtet sich nach dem  $\text{CO}_2$ -Gehalt.  $\text{CO}_2$  hat den Wasserdampf sozusagen im Schlepptau; es ist der primäre Akteur, Wasserdampf ist der sekundäre.

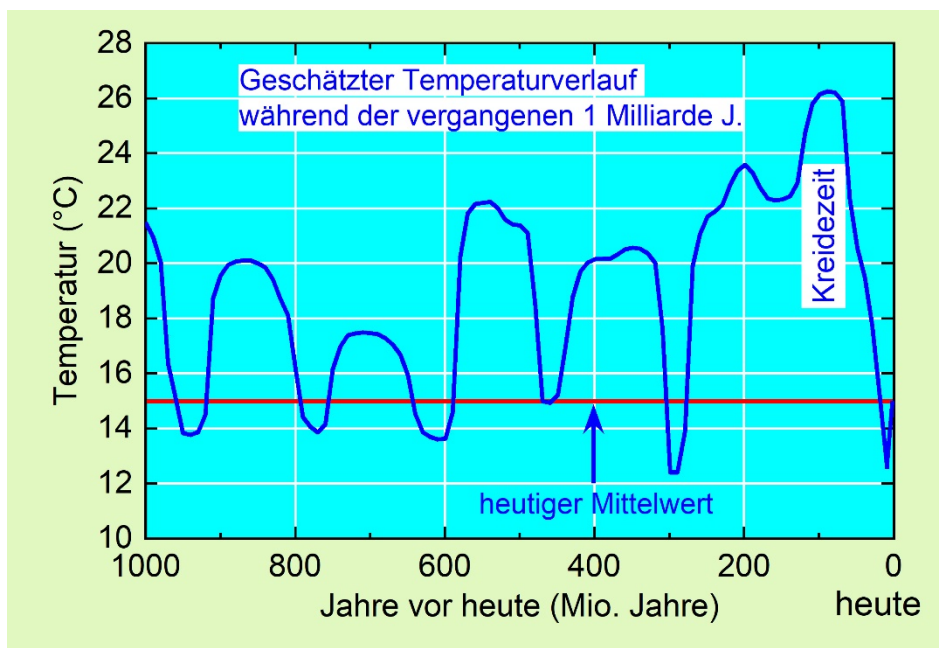
Nach dieser strapaziösen Tour werden wir wieder anschaulicher und widmen uns einem Einwand gegenüber dem menschengemachten Klimawandel, auf den wir zu sprechen kommen müssen, weil er so häufig und scheinbar so einleuchtend vorgebracht wird, nämlich:

## Klimawandel gab es schon immer

### Temperaturen in der Vergangenheit

In der Tat, Klimawandel gab es schon immer, das ist ja nun mal nichts Neues: Klimaänderungen hat es in der geologischen Vergangenheit immer gegeben. Menschen waren daran nicht beteiligt und hätten es auch nicht ändern können. Was also soll jetzt großartig anders sein?

Wenn wir einmal tief in die Vergangenheit blicken (1 Milliarde Jahre), offenbaren sich dramatische Klimawechsel (Abb. 7). In der Kreidezeit z. B. war es im Schnitt  $10^{\circ}\text{C}$  wärmer als

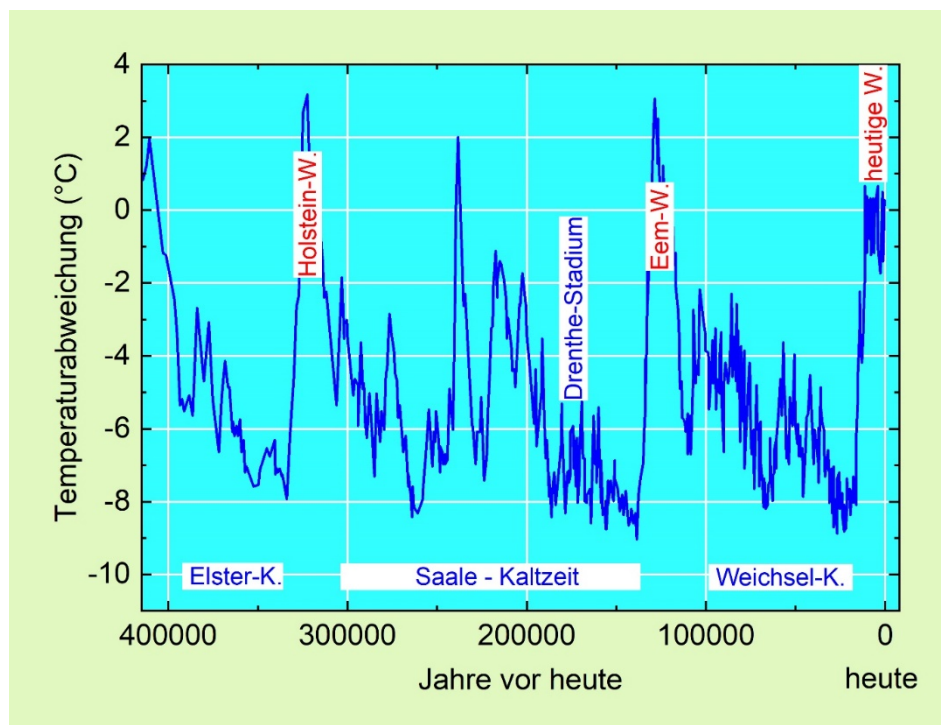


**Abb. 7:** Rekonstruierter Verlauf der Temperaturen in der geologischen Vergangenheit. Meistens lagen die Temperaturen höher als heute. Die gegenwärtige, weltweit über Tropen und Pole und über die Jahreszeiten gemittelte oberflächennahe Temperatur beträgt  $15^{\circ}\text{C}$ . (verändert nach Schönwiese, 2008)

heute, der letzte Schneekristall geschmolzen, das Meer auf dem Höchststand, das Münsterland überflutet, in Bochum saßen die Saurier am Meeresstrand in den Liegestühlen und schwitzten. Von ein paar Eiszeitaltern abgesehen war es während der Erdgeschichte durchweg wärmer als heute.

Fokussieren wir nun den Blick auf die kurze Zeit der letzten 400.000 J. So seltsam es klingen mag angesichts steigender Temperaturen: Diese Zeit ist Teil des gegenwärtigen Eiszeitalters, das vor 2,6 Mio. Jahren begann. Von Eiszeitalter sprechen wir, wenn beide Pole ganzjährig eisbedeckt sind. Vor ca. 33 Mio. Jahren löste sich der antarktische Kontinent von Südamerika und Australien, es bildeten sich kalte zirkum-antarktische Wind- und Meeresströmungen, welche die Antarktis vom wärmeren Meer abschirmten. Schnee blieb ganzjährig liegen, der antarktische Eispanzer baute sich auf und wurde bis zu 4 km mächtig.

Das arktische Meer vereiste später, vor 2,6 Mio. J., als sich die Meerenge von Panama schloss und sich das gewaltige Förderband aus warmen Oberflächen- und kalten Tiefenströmungen bildete, das von Island und Norwegen bis zur Antarktis das Atlantikwasser umwälzt (AMOC, Atlantic Meridional Overturning Circulation, ein Zungenbrecher, zugegeben); der Golfstrom ist nur ein Teil davon. Seither leben wir im quartären Eiszeitalter. Seltsam regelmäßig gliedert es sich in einen Rhythmus von ca. 100.000 J., lange Kaltzeiten (sog. Eiszeiten) wechseln mit kurzen Warmzeiten (Abb. 8).

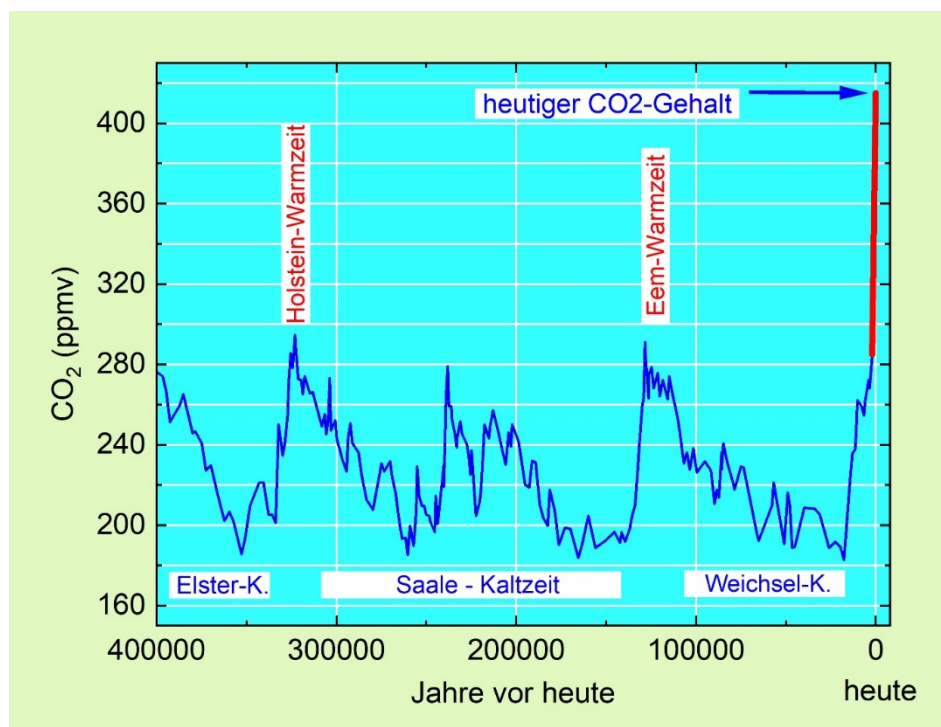


**Abb. 8:** Während der drei letzten Kaltzeiten lagen die antarktischen Temperaturen etwa  $8^{\circ}\text{C}$  unter der heutigen mittleren antarktischen Temperatur. Die globale Temperatur-Erniedrigung während der Kaltzeiten betrug dagegen nur  $4\text{-}5^{\circ}\text{C}$  bezogen auf unsere heutigen  $15^{\circ}\text{C}$ , weil die tropischen Meere dämpfend wirken. Das Münsterland ist während des Drenthe-Stadiums vom Gletscher überfahren worden (verändert nach Petit et al., 1999)

## Atmosphärische CO<sub>2</sub>-Gehalte in der Vergangenheit

In die antarktischen und grönländischen Eisschilde sind je fünf Kernbohrungen niedergebracht worden. In der Antarktis reichen sie bis in Tiefen von 4 km. In Grönland wurde der Gesteinsuntergrund bei 3 km erreicht. Die Bohrungen förderten Eis zutage, das bis zu 800.000 J. bzw. 125.000 J. alt ist.

Wenn Schnee in Firn und Eis übergeht, werden winzige Luftbläschen eingeschlossen. Die Analyse der Luft sagt uns, wie hoch der Gehalt an CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> etc. war, als sich die Bläschen am Boden des Firns in einer Tiefe von 50 m bis 100 m schlossen (Parrenin et al., 2013). Wir sehen in Abb. 9, dass der CO<sub>2</sub>-Gehalt während der drei letzten Kaltzeiten bis auf 180 ppmv herunterging, während er in den Warmzeiten auf 290 ppmv stieg. Ein kalter Ozean kann mehr CO<sub>2</sub> lösen als ein warmer, also nimmt das atmosphärische CO<sub>2</sub> in Kaltzeiten ab. Umgekehrt entlässt ein warmer Ozean CO<sub>2</sub> in die Atmosphäre. Die damalige Atmosphäre ist in den Luftbläschen konserviert und kann analysiert werden.



**Abb. 9:** Während der letzten 400.000 Jahre bewegte sich der atmosphärische CO<sub>2</sub>-Gehalt in einem Korridor zwischen 290 ppmv (Warmzeit) und 180 ppmv (Kaltzeit). Jedoch: seit etwa 1850 schießt der CO<sub>2</sub>-Gehalt steil in die Höhe und hat heute 422 ppmv erreicht (rote Linie). Was die Natur in den letzten 400.000 Jahren nicht geschafft hat, das hat der Mensch in 150 Jahren geschafft. (verändert nach Petit et al., 1999)

## Das Eis und die Temperatur

Wir gehen jetzt wieder ein bisschen in die Tiefe und fragen uns: Woher stammen die Temperaturen, die wir in Abb. 8 sehen? Um die Antwort zu verstehen, erinnern wir uns, was ein Isotop ist. Isotope sind Atome mit der gleichen Anzahl von Protonen, aber einer unterschiedlichen Anzahl von Neutronen im Atomkern. Isotope besitzen also unterschiedliche Massen, und dies wird analytisch genutzt.

Die Elemente Wasserstoff (H) und Sauerstoff (O) bestehen beide aus mehreren Isotopen. Die für Klimastudien wichtigen Isotope sind  $^{16}\text{O}$ -Atome (8 Protonen + 8 Neutronen), die 99,76% des Sauerstoffs ausmachen, und  $^{18}\text{O}$ -Atome (8 Protonen + 10 Neutronen), dazu die Wasserstoff-Atome  $^1\text{H}$  (1 Proton + 0 Neutronen), die 99,985 Prozent des Wasserstoffs ausmachen, sowie die  $^2\text{H}$ -Atome (= Deuterium, D) (1 Proton + 1 Neutron).

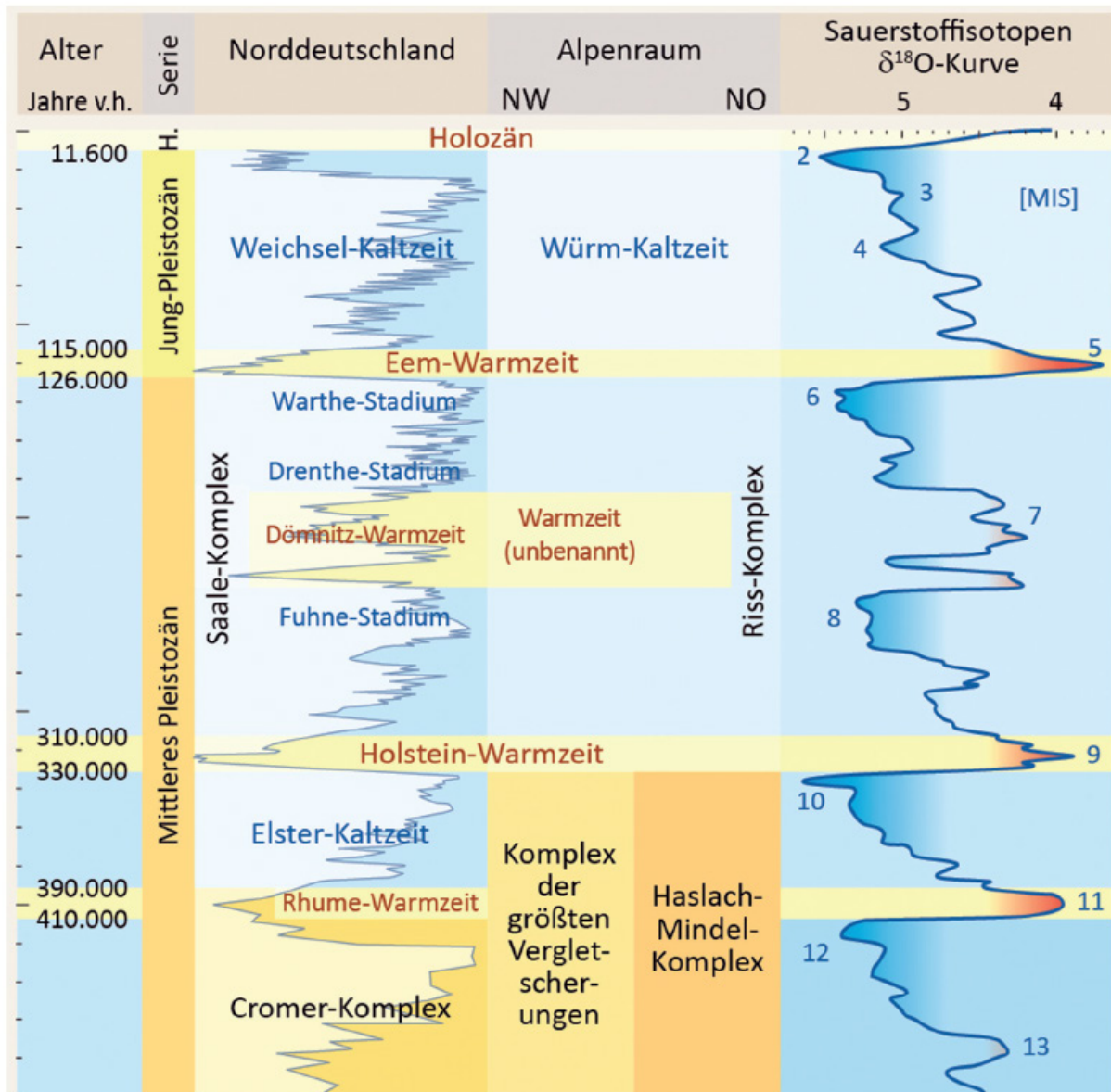
Die Temperaturbestimmung geht folgendermaßen: Zuerst wird eine Probe aus einem Eisbohrkern im Labor geschmolzen und die isotopische Zusammensetzung des Wassers massenspektrometrisch bestimmt. Massenspektrometer können höchst empfindlich die Isotope nach ihrer Masse trennen und sozusagen einzeln zählen. Daraus wird das Verhältnis von schwerem zu leichtem Sauerstoff,  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ , und von schwerem zu leichtem Wasserstoff, D/H, bestimmt. Das Ergebnis wird mit dem Isotopenverhältnis eines international anerkannten Standards verglichen (Standard Mean Ocean Water, SMOW) und daraus ein  $\delta$ -Wert berechnet, der angibt, um wieviel Promille das Isotopenverhältnis der Probe von dem des Standards abweicht ( $\delta\text{D}$  und  $\delta^{18}\text{O}$ ).

Beide  $\delta$ -Werte erzählen im Wesentlichen die gleiche Geschichte - nämlich, dass es in kalten Perioden im Eis weniger  $^{18}\text{O}$  und D gibt als in warmen Perioden. Woran liegt das? Einfach ausgedrückt, es braucht mehr Energie, um schwere Wassermoleküle von der Ozean-Oberfläche zu verdampfen als leichte. Je kälter das Meerwasser ist, d. h. je weniger Energie die Moleküle für den Übertritt Wasser  $\rightarrow$  Luft besitzen, desto weniger schwere Moleküle werden es in die Luft schaffen. Sie verbleiben im Ozean. Folglich sind im Ozeanwasser die  $\delta$ -Werte positiv, in der Luftfeuchte negativ.

Warme feuchte Luft wird polwärts transportiert und kühlt ab, es bildet sich Niederschlag, Regen oder Schnee, in dem die schweren Moleküle sich anreichern, denn wenn sie einmal im Regentropfen oder Schneekristall stecken, bleiben sie dort „gefangen“. Die Restfeuchte verarmt an ihnen, sie wird „leichter“, und folglich ist jeder neue Niederschlag ebenfalls „leichter“ als der jeweils vorige, in dem schon die schweren Moleküle angereichert sind. Die Restfeuchte, die schlussendlich als Schnee fällt und in Eis übergeht, wird am stärksten verarmt sein, und zwar umso mehr, je niedriger die Temperaturen bei Verdampfung und Transport waren. Es muss also einen Zusammenhang zwischen Temperatur und  $\delta$ -Werten geben, den man eichen kann, und zwar folgendermaßen:

$^{18}\text{O}$ - und D-Werte wurden über mehrere Jahre an einer Reihe von Standorten in den Polarregionen verfolgt. Es stellte sich heraus, dass sich die  $\delta$ -Werte nahezu linear mit der Temperatur ändern. Mit dieser - für die Eiszeiten noch nachgeschärften - Kalibrierung rechnet man, grob gesagt, die Temperaturen aus, die zum Zeitpunkt der Eisbildung geherrscht haben. Das Alter der Eisschichten bestimmt man mit Hilfe markanter vulkanischer Aschelagen und weiterer geochronologisch datierbarer Ereignisse.

So also sind die Temperaturen in Abb. 8 und ihr zeitlicher Wechsel bestimmt worden. Abb. 10 liefert eine ergänzende Gegenüberstellung der Temperaturen aus den  $\delta^{18}\text{O}$ -Werten der Eiskerne (linke Hälfte) mit den  $\delta^{18}\text{O}$ -Werten aus den Kalkschalen ( $\text{CaCO}_3$ ) von Einzellern (Foraminiferen) (rechte Hälfte) (s. Untertitel).



**Abb. 10:** Die Temperaturen in den Kalt- und Warmzeiten (blau bzw. gelb/rot) der letzten 500.000 J. korrelieren mit  $\delta^{18}\text{O}$ -Werten, welche die sog. Marine Isotope Stages (MIS 5, 7, 9 etc.) definieren. Die  $\delta^{18}\text{O}$ -Werte stammen aus 57 weltweit verteilten Tiefsee-Bohrkernen. Wenn das Ozeanwasser kalt ist, können nur relativ wenige (schwere)  $\text{H}_2^{18}\text{O}$ -Moleküle die Wasser/Luft-Grenze durchstoßen, das Wasser reichert sich an  $^{18}\text{O}$  an. Einzeller, die Kalkschalen bilden (z. B. Foraminiferen, die es im Museum Zurholt unter dem Mikroskop zu bewundern gibt) bauen Sauerstoff  $^{18}\text{O}$  entsprechend dem vorgefundenen  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ -Verhältnis in ihre Schalen ein: wenn das Wasser kalt ist, mehr  $^{18}\text{O}$  ( $\delta^{18}\text{O} \approx 5$ ), wenn es warm ist, weniger  $^{18}\text{O}$  ( $\delta^{18}\text{O} \approx 4$ ). Weil diese  $\delta^{18}\text{O}$ -Werte Tiefseetemperaturen entsprechen, geht man davon aus, dass sie indirekt die Schnee- und Eisbedeckung abbilden: in Kaltzeiten ist diese groß ( $\delta^{18}\text{O}$  groß), in Warmzeiten klein ( $\delta^{18}\text{O}$  klein) (nach Meschede, 2015).



### **Wodurch werden die Klimawechsel angestoßen? Die Milanković-Theorie**

Jetzt fragen wir uns, welche Ursache mag sich wohl hinter dem merkwürdigen 100.000-Jahresrhythmus verbergen, der in den Abb. 8 und 9 so auffällig ist? Die Lösungsidee hatte schon um 1920 herum der serbische Astrophysiker Milutin Milanković. Er vermutete, dass die zyklischen Änderungen der Erdbahn und der Position der Erdachse dahinter stecken. Heute heißen diese Zyklen Milanković-Zyklen (Milanković, 1941; Berger, 1960).

Die Erde bewegt sich auf einer Ellipse um die Sonne. Würde diese Bahn nur durch das Gravitationsfeld der Sonne bestimmt, so würde sich die Ellipse nie ändern. Aber da sind noch die übrigen Planeten, darunter der Mond und die Schwergewichte Saturn und Jupiter, die an der Erde ziehen. Sie bewirken dreierlei:

(1) die Erdbahn variiert von nahezu kreisförmig zu elliptisch (Exzentrizität), Periode 400.000 J. und 100.000 J.

(2) die Neigung der Erdachse zur Bahnebene ändert sich zwischen  $22,1^\circ$  und  $24,5^\circ$  (Obliquität), Periode 41.000 J.

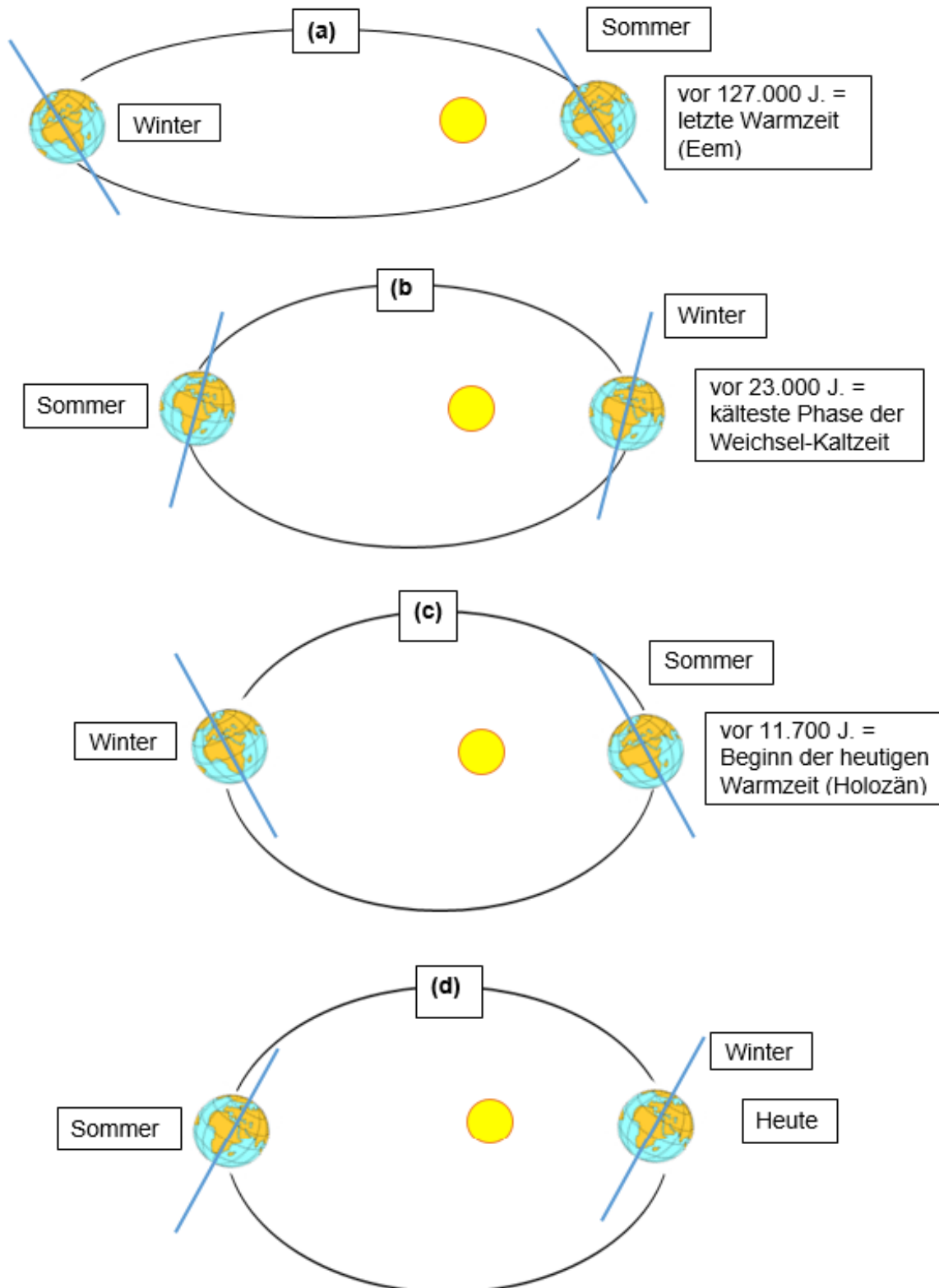
(3) die Erdachse rotiert um die Senkrechte zur Bahnebene (Präzession), Periode: 23.000 J.

Aus den keplerschen Gravitationsgleichungen können die Positionen der Planeten für jeden Zeitpunkt in Vergangenheit und Zukunft berechnet werden, und aus den verschiedenen Beiträgen der drei Bahnparameter lässt sich so für jeden Zeitpunkt für jeden Ort der Erde berechnen, wie stark die Sonne einstrahlt.

Entscheidend für das Auftreten von Klimawechseln ist, wie viel Sonneneinstrahlung die Kontinente der Nordhalbkugel im Sommer erhalten, denn es ist die große nördliche Landmasse mit ihrer Schnee- und Eisbedeckung, die empfindlich auf Einstrahlungsänderungen reagiert. Im Süden haben wir nur die ewig vereiste Antarktis. Überschreitet die Sommereinstrahlung auf der Nordhalbkugel dauerhaft eine kritische Grenze, geht im Sommer mehr Schnee und Eis verloren als im Winter gebildet wurde, und aus einer Kaltzeit entwickelt sich eine Warmzeit, und umgekehrt.

### **Beispiele**

Während der letzten Warmzeit (Eem-Zeit vor 127.000 J. – 116.000 J.) war (1) die Erdbahn deutlich elliptisch, (2) auf der Nordhemisphäre war Sommer, wenn sich die Erde am sonnen-nächsten Punkt befand und (3) die Erdachse war stärker zur Sonne hin geneigt (Abb. 11a). Diese Konstellation bewirkte zwangsläufig eine erhöhte Sommer- und eine verminderte Wintereinstrahlung auf der Nordhalbkugel (Köhler et al., 2005). Die Sommertemperaturen waren hoch, aber auch die Wintertemperaturen waren über dem arktischen Ozean und angrenzenden kontinentalen Bereichen erhöht, weil die Meereisbedeckung durch die hohen Sommertemperaturen verringert war (verringerte Albedo) und Westwinde warme Luft nach Osten transportierten.



**Abb. 11:** Konfiguration der Erdbahn (a) während der letzten Warmzeit vor 127.000 J. bis 116.000 J. (Eem-Warmzeit), (b) vor 23.000 J. während des Tiefpunktes der letzten Kaltzeit, (Weichsel-Kaltzeit), (c) vor 11.700 J. zu Beginn der jetzigen Warmzeit (Holozän), (d) heute. Die Einstrahlung auf der Nordhalbkugel ist dann besonders stark, wenn (1) die Erdbahn deutlich elliptisch ist, (2) die Erde im Nordsommer im sonnennächsten Punkt steht und (3) die Erdachse stark geneigt ist. Dies war ganz ausgeprägt zu Beginn der Eem-Zeit der Fall und etwas weniger ausgeprägt zu Beginn der jetzigen Warmzeit.

Vor 11.700 J. zu Beginn unserer jetzigen Warmzeit, dem Holozän, war die Konstellation ähnlich (Abb. 11c). Aber jetzt war die Erdbahn weniger elliptisch und die Achse weniger stark geneigt, so dass die Sommereinstrahlung auf der Nordhalbkugel geringer war als zur Eem-Zeit. Immerhin reichte es, im Sommer mehr Eis schmelzen zu lassen als sich im Winter gebildet hatte, so dass die letzte Kaltzeit, die vor 23.000 J. ihren Höhepunkt hatte, allmählich in die heutige Warmzeit überging.

Die CO<sub>2</sub>-Gehalte im Holozän und in der Eem-Zeit waren zwar ähnlich (Abb. 9); doch war die Eem-Zeit als Folge der günstigeren Bahnkonstellation (Abb. 11a,c) deutlich wärmer als das Holozän (Abb. 8).

Gegenwärtig durchläuft die Erde den sonnennächsten Punkt nicht im Nordsommer wie vor ca. 11.700 J., sondern im Nordwinter, nachdem der halbe 23.000-jährige Zyklus der Präzession durchlaufen ist (Abb. 11d). Aber die Erdbahn ist heute fast ein Kreis, so dass der Unterschied nicht so ins Gewicht fällt, dass wir dabei wären, in die nächste Kaltzeit zu rutschen, obwohl man dies eigentlich befürchten müsste angesichts der Kürze der vergangenen Warmzeiten (Abb.8).

Was dies betrifft, beruhigen uns jedoch die astronomischen Berechnungen. Sie lassen erwarten, dass die gegenwärtige Warmzeit weitere 50.000 J. andauert (Berger und Loutre, 2002). Die heutige Exzentrizität der Erdbahn ist gering, sie nimmt weiter ab und in 25.000 J. wird die Bahn so gut wie kreisförmig sein. Die geringe Exzentrizität dämpft den Einfluss der beiden anderen Bahnparameter, besonders den der Präzession.

### **Rückkopplungen**

Die Milanković-Theorie ist heute allgemein akzeptiert: die astronomischen Bahnparameter wirken als Schrittmacher der Klimazyklen. Sie wirken aber nur als Schrittmacher. Denn für die gesamte Temperaturänderung zwischen Warm- und Kaltzeit, die in der Antarktis 8°C - 12°C betragen kann, reicht die spezifische Konstellation nicht aus. Sie bewirkt nur eine geringe Temperaturänderung. Diese setzt aber eine Kette von Reaktionen, sog. Rückkopplungen, in Gang.

Bei einer Bahnkonstellation, wie sie zu Beginn der Eem-Zeit oder des Holozäns geherrscht hat, schmilzt in den nördlichen Breiten im Sommer mehr Schnee als im Winter gefallen ist. Die Schnee- und Eisflächen nehmen ab, weniger Sonnenenergie geht durch Reflexion verloren (*Eis-Albedo-Rückkopplung*), also steigt die Temperatur, das Meer erwärmt sich und entlässt CO<sub>2</sub>, der Treibhauseffekt nimmt zu (*Klimagas-Rückkopplung*), die atlantische Umwälzpumpe befördert mehr Wärme in den Norden, usw.

Das Ganze dreht sich, wenn die Bahnkonstellation dafür sorgt, dass die Einstrahlung auf der Nordhalbkugel abnimmt. Dann werden die Sommer kühl, Schnee und Eis bleiben liegen und strahlen mehr und mehr Sonnenenergie zurück. CO<sub>2</sub> wird aus der Atmosphäre entnommen und löst sich im Meer, usw.

Es ist die Summe der Rückkopplungen, die durch die astronomischen Zyklen angestoßen werden und dann eine Kaltzeit in eine Warmzeit übergehen lassen und umgekehrt.

Ein anschauliches Beispiel für die Wirksamkeit von Rückkopplungen liefert Abb. 11b. Während der tiefsten Kaltphase der letzten Kaltzeit vor ca. 23.000 J. (Abb. 8) war die Bahnkonstellation ähnlich der heutigen (Abb. 11d). Zwar war die Bahn ein wenig elliptischer und die Achsneigung

war im Minimum, beides reicht aber nicht, die Kaltphase zu erklären. Vielmehr waren es die riesigen Eisflächen, die das Sonnenlicht reflektierten, und natürlich, es war der durch den niedrigen CO<sub>2</sub>-Gehalt verminderte Treibhauseffekt, die für die niedrigen Temperaturen verantwortlich waren. Erst als sich die Bahnparameter in die Position vor 11.700 J. bewegten (Abb. 11c), wurde die kritische Einstrahlung in der Nordhemisphäre überschritten, die Eispanzer schmolzen und die Erde gelangte in die jetzige Warmzeit.

### **Der Zeitverzug zwischen Temperatur- und CO<sub>2</sub>-Anstieg**

Wenn man die Abb. 8 und 9 übereinander legt, sind sie fast deckungsgleich: wenn der CO<sub>2</sub>-Gehalt hoch ist, sind auch die Temperaturen hoch. Die ersten Bearbeitungen der Antarktisch-Bohrkerne ergaben aber, dass am Ende einer Kaltzeit zuerst die Temperatur stieg und dann erst mit einem Verzug von etlichen 100 Jahren der CO<sub>2</sub>-Gehalt folgte. Dies könnte (und hat) den Gedanken nahe gelegt, dass Temperaturanstieg – der zuerst erfolgte – und CO<sub>2</sub>-Anstieg – der nachfolgte – ursächlich gar nicht zusammenhängen, woraus der Kurzschluss folgt, dass der gegenwärtige Klimawandel nicht menschengemacht ist. Dieses Missverständnis wollen wir klären.

Die Luftbläschen in Schnee und Firn schließen sich erst an der Basis des Firns in 50 m bis 100 m Tiefe, sie haben bis dorthin also noch Austausch mit der Atmosphäre und konservieren somit den CO<sub>2</sub>-Gehalt an der Schneeoberfläche. Gleichzeitig aber halten die Schneekristalle an der Oberfläche mit ihrem  $\delta^{18}\text{O}$ -Wert die Temperatur genau dieser Oberfläche fest. Gleichzeitige Ereignisse – Schließen der Poren und Schneefall – finden also in verschiedenen Tiefen statt. Das muss man korrigieren, und man kann es mit Hilfe des  $\delta^{15}\text{N}$ -Wertes (geht hier zu weit). Für den Übergang von der letzten Kaltzeit in unsere heutige Warmzeit, der sich von 19.000 bis 11.700 vor heute erstreckte, wurden sämtliche fünf antarktischen Bohrkerne untersucht. Dieses Eis ist, weil in geringer Tiefe gelegen, am wenigsten kompakt und liefert deshalb die beste zeitliche Auflösung. Es kam heraus: „Die Änderungen des atmosphärischen CO<sub>2</sub>-Gehaltes und der lokalen antarktischen Temperatur verliefen synchron innerhalb der experimentellen Unsicherheit“ (Perrenin et al., 2013, übersetzt aus dem englischen Original).

Man kann den Übergang der vergangenen Kalt-/Warmzeiten, der sich mit seinen Temperatur- und CO<sub>2</sub>-Steigerungen über Tausende von Jahren erstreckte, nicht mit dem gegenwärtigen Klimawandel vergleichen, der erst seit gut 100 Jahren läuft. Man darf Ursache und Wirkung nicht verwechseln. Bei den vergangenen Klimawechseln stieß die Konstellation der Bahnparameter den Wechsel an (Ursache), der sich dann in den genannten Rückkopplungen steigerte (Wirkung). Jetzt sind keine Bahnparameter im Spiel, jetzt sind die Klimagase die Ursache und der Temperaturanstieg die Wirkung.

### **Die jüngere Klima-Vergangenheit**

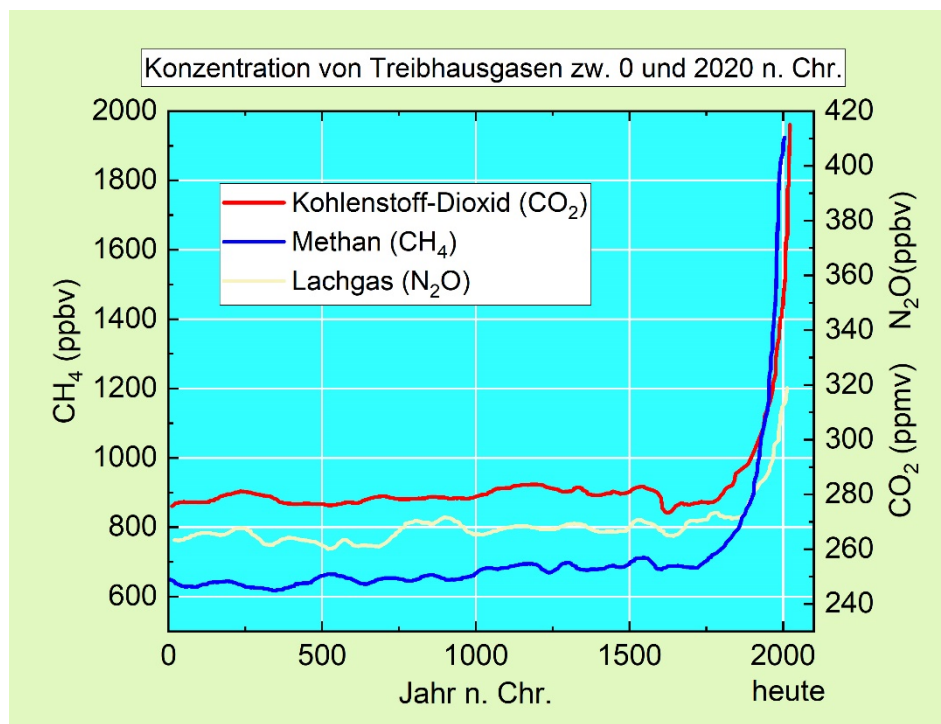
Auch wenn wir nur in die jüngere Vergangenheit, sagen wir 2000 J. zurück, bis in die Römerzeit blicken, sehen wir, dass die Temperaturen durchaus nicht konstant waren. Die Römerzeit war eine Warmphase. Sie wurde beendet durch eine Klimaverschlechterung, die zur Völkerwanderung führte. Im Hochmittelalter um 1100 n. Chr. herrschte wiederum ein Klimaoptimum. Dann ging es im frühen 15. Jh. runter in die sog. Kleine Eiszeit; wir erinnern uns an die Winterbilder der niederländischen Maler des 17. Jahrhunderts. Aus der Kleinen Eiszeit klettern die Temperaturen seit ca. 1850 n. Chr. wieder hoch. Und jetzt kommen wir halt

in eine „Kleine Warmzeit“. In der Römerzeit und im Hochmittelalter lagen die Temperaturen regional eher noch ein wenig höher als heute. Warum also sollte es sich beim gegenwärtigen Klimawandel nicht wieder lediglich um eine leichte natürliche Schwankung handeln, die der Mensch nicht verschuldet hat und die er nicht beeinflussen kann? Klimawandel gab es schon immer.

Und überhaupt, die Menschen haben immer schon  $\text{CO}_2$  produziert. Sie haben mit Holz geheizt, sie haben Brandrodung betrieben und mancher Brand wird großflächig außer Kontrolle geraten sein. Die  $\text{CO}_2$ -Produktion ist also nichts Neues.

Doch, sie ist etwas Neues. Wir sehen es in der nächsten Abbildung. Zwischen dem Jahr 0 und etwa 1850 n. Chr. ändert sich der  $\text{CO}_2$ -Gehalt nicht, erst dann zieht er nach oben, aus folgendem Grund:

Zur Zeit des Römischen Kaiserreichs lebten nur etwa 300 Mio. Menschen auf der Erde. Das hat sich über die folgenden 1500 Jahre nicht wesentlich geändert. Als das Römerreich unter dem Germanenansturm zusammenbrach, ging auch die medizinische Kenntnis der Antike verloren. Kriege, Seuchen, die hohe Kindersterblichkeit taten ein Übriges. Erst mit der industriellen Revolution begann die Weltbevölkerung zu explodieren und mit ihr der Ressourcenverbrauch und der Verbrauch an fossiler Energie. Deshalb also begann erst ab ca. 1850 n. Chr. die Konzentration der Klimagase zu steigen (Abb. 12). Aus dem Ruder gelaufene Brandrodungen in früherer Zeit hatten keinen merklichen Einfluss.



**Abb. 12:** Verlauf der Konzentration der Klimagase  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  und  $\text{N}_2\text{O}$  vom Jahr 0 bis 2005. Die Konzentrationen blieben bis etwa 1800 n. Chr. konstant und begannen mit der industriellen Revolution zu steigen. (nach IPCC, 2007: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. FAQ 2.1)

## Modellrechnungen

### Der Anstieg – menschengemacht oder natürlich?

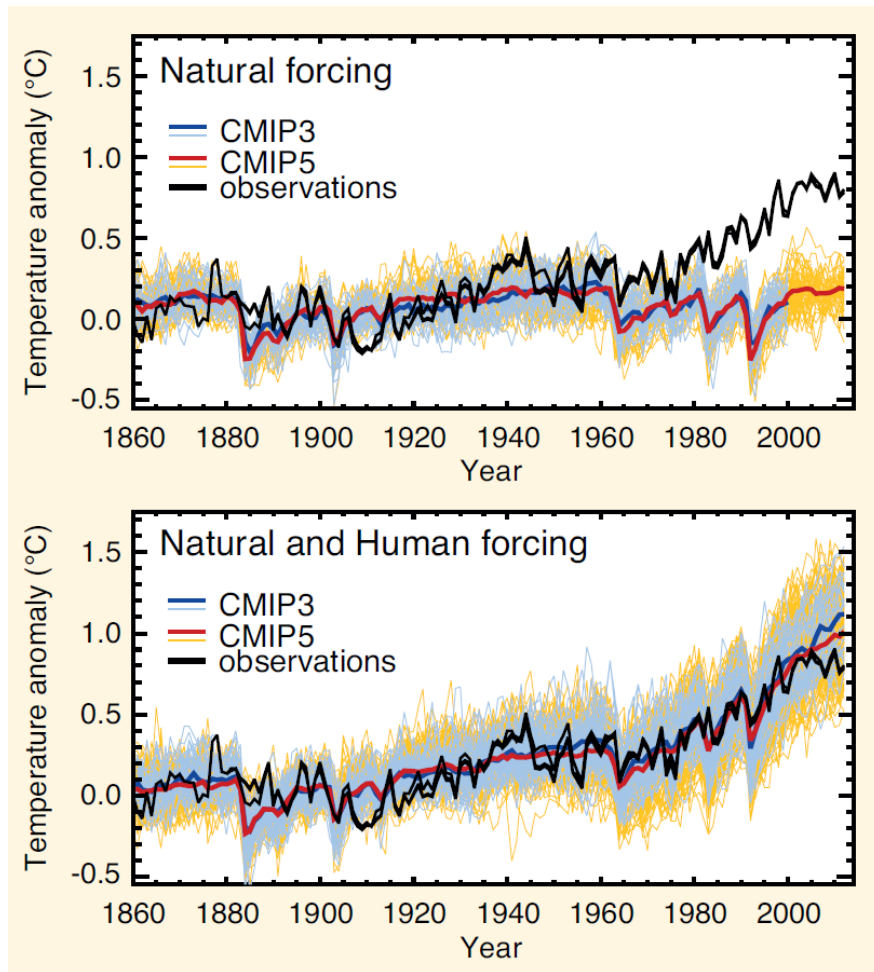
Klimamodelle sind der Versuch, die Erkenntnisse der Klimaphysik rechnerisch umzusetzen und Prognosen für die Zukunft zu finden. Da kommt bei vielen sofort die Reaktion: „Wir können das Wetter nicht für drei Tage vorhersagen, wie soll dies beim Klima für kommende Jahrzehnte möglich sein“? Der Unterschied zwischen Wetter und Klima ist das Chaos. Wir machen es an einem simplifizierten Beispiel klar.

Wir stellen uns vor, wir haben im Herbst einen Haufen Blätter zusammengereicht, aber plötzlich fährt ein Windstoß rein und wirbelt sie alle hoch. Den hochgewirbelten Haufen halten wir gedanklich nach einer Sekunde fest und machen ein Foto, dann lassen wir den Haufen weiter wirbeln und machen nach einer weiteren Sekunde ein zweites Foto. Jetzt nehmen wir an, wir hätten nach der ersten Sekunde aus dem Haufen ein einziges Blatt herausgenommen und dann ohne dieses eine Blatt weiterwirbeln lassen. Wie sähe der Haufen auf dem zweiten Foto aus? Nahezu gleich oder anders? Er sähe ganz anders aus, denn dieses eine Blatt hätte nicht an seine Nachbarn gestoßen, diese nicht an ihre Nachbarn usw. Das heißt, das Endergebnis (nach zwei Sekunden) hängt stark ab von den Anfangsbedingungen (nach einer Sekunde). Dies ist das Kennzeichen eines chaotischen Systems. Ein solches ist das Wetter und deshalb ist es *prinzipiell* allenfalls kurzfristig vorhersagbar (die Wetterfrösche hören es nicht gern).

Es gibt das schöne Bild „Der Flügelschlag eines Schmetterlings in Rio de Janeiro kann einen Wirbelsturm in Houston, Texas, auslösen oder verhindern“. Der Satz stammt nicht von einem poetisch begabten Journalisten, sondern von Edward Lorenz, einem renommierten theoretischen Meteorologen am Massachusetts Institute of Technology, Ma, USA, der sich so 1963 auf einer Fachtagung in Rio de Janeiro äußerte. Mit diesem Bild fasste er ernüchert, aber poetisch die Ergebnisse seiner dreijährigen Modellrechnungen für die Wettervorhersage zusammen. „Ändere die Anfangsbedingungen um eine Winzigkeit und das Endergebnis wird vollkommen anders sein“.

Von Klima reden wir dagegen, wenn wir über das Wettergeschehen von, sagen wir, 30 Jahren mitteln; der „Flügelschlag des Schmetterlings“ ist dann ohne Belang. Klima ist die Langzeitstatistik des Wetters (Schönwiese 2020). Der Unterschied ist: die Wettervorhersage hat das Problem der Anfangswerte, die Klimamodellierung hat dieses Problem zwar nicht, aber sie muss Randwerte angeben, d. h. wie ändert sich die Sonneneinstrahlung, wie ändert sich die Schnee- und Eisbedeckung, wie stark nehmen die Klimagase zu, usw.?

Nach dieser langen Vorrede fassen wir den augenblicklichen Stand der Modellierungen für 1880 n. Chr. bis heute in Abb. 13 zusammen. Die schwarze Zackenkurve stellt die beobachteten Temperaturen dar. Darunter liegen im oberen Diagramm zwei Kurven, die fast zusammenfallen. Sie stammen von Klimamodell-Rechnungen, die nur natürliche Temperatureinflüsse (Veränderungen der Sonneneinstrahlung, Vulkanereignisse) berücksichtigen. Beobachtung und Modell stimmen nur dann überein, wenn die menschengemachten Einflüsse, vor allem Klimagase und Aerosole, einbezogen werden (unteres Diagramm).



**Abb. 13:** Beobachteter und modellierter Temperaturverlauf von 1860 – 2010 n. Chr. (Temperature anomaly = Abweichung vom Mittelwert 1860-1920). Beobachtete Temperaturen sind schwarz gezeichnet. Die roten und blauen Kurven im oberen Diagramm stellen die Resultate von zwei Ensembles von Modellrechnungen dar, in denen nur natürliche Klimaeinflüsse berücksichtigt wurden (Sonneneinstrahlung, Vulkanereignisse). Nur wenn die menschengemachten Einflüsse (Klimagase, Aerosole) einbezogen werden, stimmen Rechnung und Beobachtung überein. Wie man sieht, hat die menschliche Aktivität seit 1860 die Temperatur bereits um ca. 1°C, nämlich von 14°C vorindustriell auf gegenwärtig 15°C erhöht. (IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. FAQ 10.1, Daten von Miller et al., 2014).

## Konsonanzen und Dissonanzen

### Die atmosphärische Gegenstrahlung

Die Existenz des natürlichen Treibhauseffekts stellt für alle, die den menschengemachten Klimawandel bezweifeln, argumentativ ein gravierendes Problem dar, es ist sogar das zentrale Problem. Denn wenn es den natürlichen Treibhauseffekt gibt, hat CO<sub>2</sub> tatsächlich den Schwarzen Peter. Dann ist der gegenwärtig laufende Klimawandel menschengemacht, weil jedes zusätzliche CO<sub>2</sub>-Molekül die atmosphärische Gegenstrahlung verstärkt und zur Erwärmung des Klimasystems beiträgt. Weil aber nach Meinung mancher der Klimawandel nicht menschengemacht ist, CO<sub>2</sub> also unschuldig ist, darf es den natürlichen Treibhauseffekt nicht geben. Dann allerdings steht man entgegen der Meinung der Physik (z. B. Vogel, 1995; Schroeder, 2018). Und da hat man immer schlechte Karten.

Über die „Zu-wenig-“ und die „Zu-viel-CO<sub>2</sub>-“Meinung haben wir schon gesprochen.

Ein weiterer Einwand gegen die atmosphärische Gegenstrahlung wurde 2009 in einer Arbeit von Gerlich und Tschuschner erhoben. Der Zweite Hauptsatz der Thermodynamik sei verletzt. Das wäre in der Tat gravierend. Glücklicherweise wurde bereits 2010 von H. J. Lüdecke, Pressesprecher bei EIKE (s. u.), und R. Link widersprochen: „Wenn von ‚Gegenstrahlung‘...die Rede ist, entstehen gelegentlich Missverständnisse. Kann ein kälterer Körper, z.B. Wolken, einem wärmeren Körper, z.B. einem Menschen am Erdboden, Wärme zuführen, und widerspricht dies nicht dem 2. Hauptsatz? Natürlich nicht...Beim Strahlungsaustausch kühlt der wärmere Körper lediglich langsamer ab...Ein einzelnes abgestrahltes Photon weiß nicht mehr, ob es von einem warmen oder einem kalten Körper kommt. Es kann immer, auch wenn es vom kälteren Körper kommt, im wärmeren Körper ein Molekül anregen. Beim Übergang in den Grundzustand...wird das Molekül diese Energie abgeben und damit zur Erhöhung der kinetischen Energie, d. h. der Wärme und damit der Temperatur des wärmeren Körpers beitragen“. Zitat Ende.

Greifen wir nochmals den beliebten Einwand auf: „Klimawandel gab es schon immer“. Gewöhnlich bezieht sich dieses „immer“ auf die Schwankungen der letzten 2000 Jahre. Der Einwand hat eine logische Schwäche, denn er impliziert: Weil es in den vergangenen zwei Jahrtausenden Klimaschwankungen gab, die nicht menschengemacht waren, ist der jetzige Wandel auch nicht menschengemacht. Das ist so, als würde man argumentieren: heute am Sonntag ist das Wetter schön, weil es von Montag bis Sonnabend schön war. Der Schluss ist natürlich logisch nicht erlaubt. Es ist ein Analogieschluss. Ein Analogieschluss ist nur dann erlaubt, wenn sich die Bedingungen für das jetzige Ereignis nicht von den Bedingungen für die früheren Ereignisse unterscheiden. Das tun sie aber. Die Konzentration der Klimagase, die sich über zwei Jahrtausende nicht geändert hat, geht jetzt himmelwärts (Abb. 9, 12).

Es gibt geradezu unzählige, Verwirrung stiftende Einlassungen, die auch beim Small Talk überzeugend überkommen können. Es sollen Zweifel gesät werden und die Ergebnisse seriöser Forschung gestört werden. Eine nette, leicht lesbare Seite mit Fragen und Antworten ist die folgende: <https://skepticalscience.com/argument.php>

### **EIKE, das „Europäische Institut für Klima und Energie“**

In den U.S.A. wird die Leugnung des menschengemachten Klimawandels betrieben wie eine Industrie, gesponsert mit enormen Mitteln der fossilen Industrie. Als Anfang der neunziger Jahre die Hinweise auf den Klimawandel deutlicher wurden, gründeten Auto-, Öl-, Gas- und Kohlekonzerne Organisationen mit wohlklingenden Namen, Global Climate Coalition oder Information Council on the Environment, mit der Aufgabe, Politik und Bevölkerung zu desinformieren. Fake-News nennen wir dies heute. Mit dieser Absicht werden im ganzen Land Radiostationen, Fernsehsender, Printmedien und Thinktanks gesponsert. DIE ZEIT (25.11.2010) nennt sie „Die Gehilfen des Zweifels“.

In Deutschland ist EIKE, das sogenannte „Europäische Institut für Klima und Energie“ tätig (<https://eike-klima-energie.eu/>). Ein beeindruckender Name. Es handelt sich aber gar nicht um ein wissenschaftliches Institut mit Wissenschaftlichen Mitarbeitern, deren Forschungsarbeiten aus öffentlichen Mitteln (DFG, BMFT, EU u. a.) finanziert werden und die sich auf nationalen und internationalen Fachtagungen der Diskussion stellen, im Gegensatz zu EIKE-Mitgliedern, die auf solchen Tagungen kaum sichtbar sind. Vielmehr ist EIKE ein eingetragener Verein mit



einem Briefkasten in Jena, finanziert aus Spenden ([https://lobbypedia.de/wiki/Europäisches\\_Institut\\_für\\_Klima\\_und\\_Energie](https://lobbypedia.de/wiki/Europäisches_Institut_für_Klima_und_Energie)).

EIKE wurde 2007 gegründet. Die Homepage zeigt, EIKE hat in 15 Jahren ganze 18 wissenschaftliche Publikationen zustande gebracht, dazu nur einen einzigen Beitrag auf einer internationalen Tagung. Fachtagungen werden gemieden. An den Publikationen beteiligt sind sieben EIKE-Autoren und neun auswärtige Autoren. Der Output von 16 Autoren in 15 Jahren erschöpft sich in 18 Publikationen. Das ist geradezu vernichtend.

Jeder ehrlich gemeinte Beitrag zur Diskussion ist notwendig und willkommen. EIKEs Ton der besserwissenden Häme aber, die Attitüde des einsamen Rufers, der über dem Mainstream schwebend den Durchblick hat, sie sind verzichtbar.

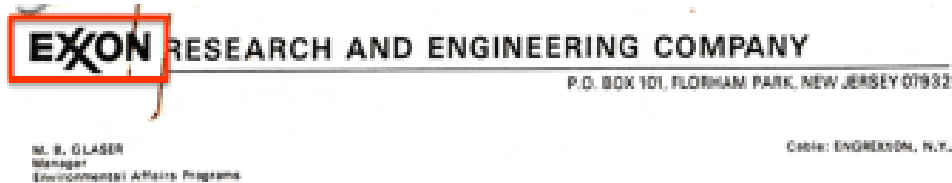
Bis vor etwa vier Jahren hieß die EIKE-Seite „klimaskeptiker.info.de“. Dort wurde eine Liste von 450 Publikationen geführt, die – so wurde behauptet – dem menschengemachten Klimawandel widersprechen. Die Liste scheint an Schwindsucht zu leiden. Zurzeit enthält sie noch 135 Publikationen. Die Zahl der Publikationen in Gutachter-Zeitschriften, die zum gegenteiligen Ergebnis kommen, geht wahrscheinlich in die Zehntausende.

### **Der EXXON-Konzern**

Vollends konterkariert werden die Bemühungen, den menschengemachten Klimawandel zu bestreiten ausgerechnet durch einen wichtigen Sponsor, den EXXON-Konzern. Vor 40 (!) Jahren, am 12.11.1982, berichtete der Manager „Environmental Affairs“ an seine Vorgesetzten das Ergebnis einer Studie von EXXON-Wissenschaftlern zur Entwicklung von CO<sub>2</sub>-Gehalt und Temperatur, mit der Maßgabe „The material...should...not be distributed externally“ (Abb. 14). Die EXXON-Studie hat die Entwicklung unglaublich zutreffend vorhergesagt (Abb. 15) - und verschwiegen. Das nennt man zynisch. Kein weiterer Kommentar.

Nur nebenbei: Modellrechnungen werden gern angezweifelt. EXXON selbst zeigt uns allerdings, so unsinnig sind sie anscheinend doch nicht.

Wir erleben bei der fossilen Industrie ein Verhalten, das analog ist zum Verhalten der Tabak-industrie, die uns über Jahrzehnte mithilfe von Gerichtsverfahren und gekauften Wissenschaftlern klar gemacht hat, wie gesund das Rauchen doch ist. Bis es nicht mehr ging. Bis die Wahrheit nicht mehr zu leugnen war und die hässlichen Bilder der Wahrheit auf die Zigarettenpackungen gedruckt wurden.



November 12, 1982

CO<sub>2</sub> "Greenhouse" Effect

82EAP 266

TO: See Distribution List Attached

Attached for your information and guidance is briefing material on the CO<sub>2</sub> "Greenhouse" Effect which is receiving increased attention in both the scientific and popular press as an emerging environmental issue. A brief summary is provided along with a more detailed technical review prepared by CPPD.

The material has been given wide circulation to Exxon management and is intended to familiarize Exxon personnel with the subject. It may be used as a basis for discussing the issue with outsiders as may be appropriate. However, it should be restricted to Exxon personnel and not distributed externally.

Very truly yours,

M. S. GLASER

Abb. 14: © Base graph: Exxon Research and Engineering Company 1982, used under citation rights | Overlays: © Gregor Hagedorn, CC BY-SA 4.0  
[https://files.scientists4future.org/index.php?path=10\\_\\_Klima](https://files.scientists4future.org/index.php?path=10__Klima)

**1982:**

Exxon schätzt  
Entwicklung  
von CO<sub>2</sub> und  
Temperatur  
bis 2100.

**Gute  
Arbeit!**

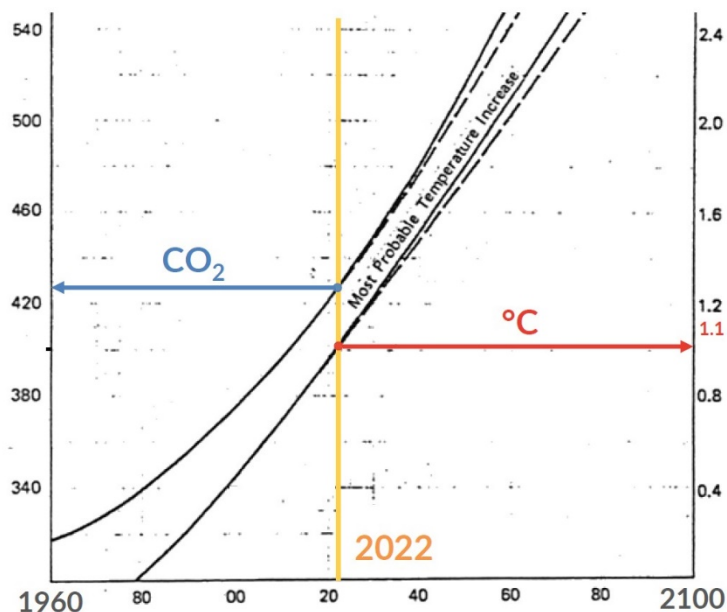


Abb. 15: © Base graph: Exxon Research and Engineering Company 1982, used under citation rights, Overlay and Text: © Gregor Hagedorn, CC BY-SA 4.0  
[https://files.scientists4future.org/index.php?path=10\\_\\_Klima](https://files.scientists4future.org/index.php?path=10__Klima)

Den Schlussakkord setzt die lustige, traurige Karikatur von Gerhard Mester.



**Abb. 16:** Klimawandel gibt es nicht. Gerhard Mester, CC BY-SA 4.0.

[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Karikatur\\_von\\_Gerhard\\_Mester\\_zum\\_Thema\\_Klimawandel\\_gibt\\_es\\_nicht\\_O12816.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Karikatur_von_Gerhard_Mester_zum_Thema_Klimawandel_gibt_es_nicht_O12816.jpg)

## Literaturverzeichnis

### Nützliche Web-Seiten zum Thema

<https://info-de.scientists4future.org/> (Scientists for Future)

<https://skepticalscience.com/translation.php?lang=6>

<https://scrippsco2.ucsd.edu/> (CO<sub>2</sub>-Mess-Staionen)

<https://wiki.bildungsserver.de/klimawandel/index.php/Hauptseite> (Hamburger Bildungsserver)

<https://www.deutsches-klima-konsortium.de/de/klimafaq-5-1.html>

<https://www.iceandclimate.nbi.ku.dk/> (Center for Ice and Climate, Universität Kopenhagen)

<https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/> (Intergovernmental Panel on Climate Change)

<https://www.klimafakten.de/fakten-statt-behauptungen/fakt-ist>

<https://www.klima-warnsignale.uni-hamburg.de/>

<https://www.realclimate.org/index.php/archives/2007/05/start-here/>

<https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimawandel/haeufige-fragen-klimawandel#klima>

## Referenzen

- Berger A. (1960) The Milankovitch astronomical theory of paleoclimates - a modern review. *Vistas in Astronomy* **24**, 103-122
- Berger A. und Loutre M. F. (2002) An exceptionally long interglacial ahead? *Science* **297**, 22.Aug., 1287-1288
- Gerlich G. und Tscheuschner R. (2009) Falsification of the atmospheric CO<sub>2</sub> greenhouse effects within the frame of physics. *International Journal of Modern Physics* **23(3)**, 275
- Hagedorn G. et al. (2019) Der Klimawandel. Materialsammlung von Scientists for Future für Lehrende und Lernende. Version 11.09.2019
- Haken H. und Wolf H. C. (2006) *Molekülphysik und Quantenchemie*. 5. Auflage. Springer-Verlag
- Hoffmann, G. (2009) Sie ist gesättigt, sie ist es nicht, sie ist gesättigt, ... Anmerkungen zum Strahlungstransport. <https://www.scienceblogs.de/primaklima/2009/03/sie-ist-gesattigt-sie-ist-es-nicht-sie-ist-gesattigt-anmerkungen-zum-strahlungstransport.php>
- IPCC (2007) *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. FAQ 1.3. Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA
- IPCC (2013) *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. FAQ 10.1. Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA
- Kaspar F., Kühl N., Cubasch U., Litt T. (2005) A model-data comparison of European temperatures in the Eemian. *Geophysical Research Letters* **32**, L11703, doi:10.1029/2005GL022456
- Kiehl J. T. und Trenberth K. E. (1997) Earth's annual global mean energy budget. *Bulletin of the American Meteorological Society* **78/2**, 197
- Lüdecke H. J. und Link R. (2010) Der Treibhauseffekt. Vortrag 18.1.2010. als pdf-Datei auf [www.info.klimaskeptiker.de](http://www.info.klimaskeptiker.de)
- Meschede M. (2015): Vereiste und eisfreie Erde. Ein Überblick. In: Lozán, J. L., H. Grassl, D. Kasang, D. Notz & H. Escher-Vetter (Hrsg.). *Warnsignal Klima: Das Eis der Erde*. pp 31-37. [www.klima-warnsignale.uni-hamburg.de](http://www.klima-warnsignale.uni-hamburg.de) - doi:10.2312/warnsignal.klima.eis-der-erde.05
- Milanković M. (1920) *Théorie mathématique des phénomènes thermiques produits par la radiation solaire*. XVI, Gauthier-Villars, Paris
- Milankovitch M. (1941) *Kanon der Erdbestrahlung und seine Anwendung auf das Eiszeitenproblem*. Spec. Acad. R. Serbe, Belgrad
- Miller R. L., Schmidt G. A., Nazarenko L. S., Tausnev N., Bauer S. E., DelGenio A. D., Kelley M., Lo K. K., Ruedy R., Shindell D. T., Aleinov I., Bauer M., Bleck R., Canuto V., Chen Y., Cheng Y., Clune T. L., Faluvegi G., Hansen J. E., Healy R. J., Kiang N. Y., Koch D., Lacis A. A., LeGrande A. N., Lerner J., Menon S., Oinas V., Garcia-Pando C. P., Perlwitz J. P., Puma M. J., Rind R., Romanou A., Russell G. L., Sato M., Sun S., Tsigaridis K., Unger N., Voulgarakis

- A., Yao M.-S., Zhang J. (2014) CMIP5 historical simulations (1850–2012) with GISS ModelE2, *J. Adv. Model. Earth Syst.* **6**, 441–477, doi:10.1002/2013MS000266.
- Parrenin F., Masson-Delmotte V., Köhler P., Raynaud D., Paillard D., Schwander J., Barbante C., Landais A., Wegner A., Jouzel J. (2013) Synchronous change of atmospheric CO<sub>2</sub> and Antarctic temperature during the last deglacial warming. *Science* **339**, 1060-1063
- Petit J. R., Jouzel J., Raynaud D., Barkov N. I., Barnola J.-M., Basile I., Bende M., Chappellaz J., Davisk M., Delaygue G., Delmotte M., Kotlyakov V. M., Legrand M., Lipenkov V. Y., Lorius C., L. Pépin L., Ritz C., Saltzman E., Stievenard M. (1999) Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica. *Nature* **399**, 429-436
- Schönwiese C.-D. (2008) Klimaänderungen – ein kompliziertes Erscheinungsbild. In: Sentker A, Wigger F. (Hrsg.). *Planet Erde*. Spektrum-Verlag, S. 87-96
- Schönwiese C.-D. (2020) *Klimawandel kompakt*. Ein globales Problem wissenschaftlich erklärt. 3.Aufl., Verlag Borntäger Stuttgart
- Schroeder D. V. (2018) *Thermodynamik und statistische Physik*. Pearson Deutschland GmbH.
- Scientists for Future: [https://files.scientists4future.org/index.php?path=10\\_\\_Klima](https://files.scientists4future.org/index.php?path=10__Klima) (Der Klimawandel, Materialsammlung für Fortgeschrittene, Version vom 22.02.2022, Folien 138 und 140)
- Vogel H. (1995) *Gerthsen-Physik*. Springer-Verlag. Berlin, Heidelberg, New York.



