

Welchen Einfluss hat CO₂ auf das Klima?

Von [Dr. Eike Roth](mailto:eike.roth@energie-fakten.de), eike.roth@energie-fakten.de

1. Problemstellung

Die "offizielle Klimawissenschaft" geht davon aus, dass CO₂ in der Atmosphäre das Klima der Erde stark erwärmt und katastrophale Folgen unvermeidbar sind, wenn die anthropogenen CO₂-Freisetzungen nicht drastisch reduziert werden. Aber es gibt auch Gegenstimmen: Manche Experten erwarten nur eine geringe Erwärmung, die auch keine katastrophalen Folgen hat, andere Menschen sprechen dem CO₂ überhaupt jeglichen Klimaeinfluss ab und wiederum andere meinen, dass es sogar kühlt. Diesen "abweichenden" Meinungen gemeinsam ist, dass ihnen zufolge keine gravierenden Reduzierungen der anthropogenen CO₂-Freisetzungen notwendig sind. Aber das ist schon das Ende der Gemeinsamkeiten. Zwischen den Anhängern aller unterschiedlichen Meinungen tobt ein heftiger Streit. Ich will hier den Versuch einer integrierenden Darstellung unternehmen und zur Diskussion stellen.

Dabei möchte ich auf 3 häufig diskutierte Effekte näher eingehen, denen ich zunächst die Arbeitstitel

- "Erwärmung durch Absorption von Infrarot-Strahlung"
- "Verstärkung oder Abschwächung" und
- "Kühlung durch Emission von Infrarot-Strahlung"

geben möchte. Ich will darlegen, wie diese Effekte funktionieren - wenn sie denn funktionieren - und ich will häufig vorgebrachte Argumente für und gegen sie diskutieren. Abschließend möchte ich dann versuchen, die Frage der anthropogenen Klimaerwärmung vor dem Hintergrund der historischen Klimaentwicklung zu beleuchten und schließlich werde ich es wagen, einen Vorschlag für das weitere Vorgehen zu machen.

2. Erwärmung durch Absorption von Infrarot-Strahlung

Für die "Erwärmung durch Absorption von Infrarot-Strahlung" sind die folgenden 4 physikalischen Einzelprozesse maßgeblich:

- I. Die (mittlere) Temperatur der Erdoberfläche stellt sich so ein, dass die Erde insgesamt gleich viel Energie in den Weltraum abstrahlt, wie sie von der Sonne erhält (gleiche Leistungen).
- II. Die optischen Eigenschaften von CO₂ sind wellenlängenabhängig. Der Atmosphäre in kleinen Mengen beigemischt ("Spurengas"), lässt es die (kurzwellige) hereinkommende Strahlung der Sonne praktisch ungehindert durch, absorbiert aber

von der (langwelligen) Infrarot-Abstrahlung der Erde einen erheblichen Teil (Gase, die solche asymmetrischen optischen Eigenschaften haben, bezeichnet man als "Treibhausgase"; Wasserdampf ist ein weiteres Beispiel für ein Treibhausgas).

- III. Diese Absorption führt der Atmosphäre Energie zu. Die dadurch erwärmte Atmosphäre (das CO₂ und die anderen "Treibhausgase" in dieser) strahlen Energie ab, je etwa die Hälfte zur Erde ("Gegenstrahlung") und in den Weltraum.
- IV. Die Erde erhält daher zusätzlich zur unverändert gleich hohen Sonnenstrahlung auch noch die "Gegenstrahlung", die sie zumindest weitgehend absorbiert. Dadurch erwärmt sie sich über den Zustand "ohne Gegenstrahlung" hinaus.

Diese Prozesse sind physikalisch unstrittig: Wenn zu- und abgeführte Leistung der Erde nicht gleich groß sind, verändert die Erde unvermeidbar ihre Temperatur, solange, bis das Gleichgewicht hergestellt ist, die (asymmetrischen) optischen Eigenschaften von CO₂ sind durch vielfache Messungen gut belegt, die Absorption von Strahlung führt der Atmosphäre unvermeidbar Wärme zu, die Treibhausgase in der warmen Atmosphäre müssen Energie abstrahlen, prinzipiell in alle Richtungen gleich, und die Erde muss sich bei erhöhter zugeführter Energie (mehr Leistung) erwärmen, bis ein neues Gleichgewicht erreicht wird (Diskussion zum Teil weiter unten). Es sollte daher unstrittig sein, dass CO₂ auf diesem Weg die Erde erwärmt, die Physik fordert dieses ohne wenn und aber. Trotzdem werden immer wieder Gegenargumente vorgebracht, von denen ich die wichtigsten nachfolgend diskutieren will.

Vorher aber noch etwas zur Namensgebung: Weil der Prozess mit der Absorption von Infrarot-Strahlung der Erde im CO₂ (und in anderen Treibhausgasen) der Atmosphäre beginnt (Gegenstrahlung und Erderwärmung durch diese sind dann nur zwangsweise Folgen), scheint mir der gewählte Arbeitstitel "Erwärmung durch Absorption von Infrarot-Strahlung" einigermaßen gut zu passen. Das Problem ist nur, dass es für diesen Prozess schon einen eingeführten Namen gibt: Er wird üblicherweise als "Treibhauseffekt" (THE) bezeichnet. Das ist allerdings leider etwas unglücklich gewählt, weil in einem "normalen" Treibhaus die Unterbindung der Luftströmung durch Wände und Glasdach viel stärker für die Erwärmung verantwortlich ist als die Gegenstrahlung des Glases, aber die Bezeichnung ist nun einmal eingeführt. Nachfolgend werde ich sie daher auch hier verwenden, wobei ich weiter unten noch ein Problem in der Definition des Begriffes aufgreifen werde.

3. Argumente gegen eine Erwärmung durch Absorption von Infrarot-Strahlung

Vorbemerkung: Die nachfolgend aufgeführten Argumente überlappen sich zum Teil. Der besseren Klarheit willen möchte ich sie aber einzeln diskutieren.

- a) *Der THE widerspricht dem 2. Hauptsatz der Thermodynamik*: Das stimmt eindeutig nicht. Der 2. Hauptsatz besagt, dass Wärme netto immer vom wärmeren zum kälteren Körper übergeht (wichtig ist dabei das Wort "netto", siehe hierzu auch die Ausführungen unter Lit. g)). Genau das ist beim THE immer erfüllt: Die Sonne ist wärmer als die Erde, diese ist wärmer als die Atmosphäre und die schließlich ist wärmer als der Weltraum und genau in dieser Reihenfolge wird die Wärme (netto) übertragen. Auch wenn Erde und Atmosphäre durch den THE ein bisschen wärmer werden, bleibt die Relation erhalten und Wärme geht sowohl während des Überganges als auch im neuen Gleichgewichtszustand netto immer nur von warm nach kalt. Der 2. Hauptsatz wird daher stets eingehalten, er verbietet den THE gerade nicht (Hinweis: die Atmosphäre hat keine einheitliche Temperatur und durch den THE werden die unteren Schichten wärmer und die oberen kälter, darauf komme ich weiter unten nochmals zurück).
- b) *Ein kalter Körper (die Atmosphäre) kann einen wärmeren Körper (die Erde) nicht erwärmen*): Das stimmt nur für nicht beheizte Körper, beheizte Körper reagieren anders. Sie stellen ihre (Gleichgewichts)Temperatur immer so ein, dass zu- und abgeführte Leistung gleich groß sind. Wird bei gleicher Wärmezufuhr die Wärmeabfuhr verringert, muss der (beheizte) Körper sich erwärmen, egal, wodurch er beheizt wird und egal, wodurch die Verringerung der Wärmeabfuhr zustande kommt. Insbesondere muss er sich auch dann erwärmen, wenn die Verringerung der Wärmeabfuhr durch Hinzufügen eines kälteren Körpers bewirkt wird. Dass das sehr wohl passieren kann, kennen wir aus zahlreichen Beobachtungen im "normalen Leben": Wenn wir einen beheizten Körper (besser) isolieren, erwärmt er sich. Die hinzugefügte Isolierung erhöht den Wärmedurchgangswiderstand und verringert dadurch die Wärmeabfuhr, bei konstanter Heizung muss der Körper sich erwärmen (bzw., wenn wir die Temperatur konstant halten wollen, kommen wir mit geringerer Heizung aus). Dabei hat die Isolierung immer eine niedrigere Temperatur als der Körper selbst, es erwärmt also immer eine kalte Isolierung einen warmen (aber beheizten!) Körper. Ich möchte nur 2 Beispiele nennen: Den Wintermantel, der uns wärmt, obwohl er keine 37 °C hat, und die verbesserte Isolierung der Außenwände eines Hauses, die uns hilft, Heizkosten zu sparen, obwohl sie viel kälter ist als der beheizte Raum.

Ganz Analoges geschieht beim THE: Bei ihm wird die Verringerung der Wärmeabfuhr der Erde dadurch erreicht, dass ein Teil (X %) der sonst in den Weltraum abgestrahlten Energie über Absorption im CO₂ und Gegenstrahlung zurück zur Erde geleitet wird: Statt 100 % werden nur noch (100 - X) % Wärme in den Weltraum abgeführt, Wärmezufuhr (100%) und Wärmeabfuhr [(100 - X) %] sind nicht mehr im Gleichgewicht und die Erde muss sich erwärmen. Das CO₂ wirkt einfach wie eine zusätzliche Isolierung der Erde, es erwärmt diese, obwohl es selbst kälter ist als sie (natürlich erwärmt es die Erde nur, wenn diese weiterhin von der Sonne beheizt wird!). Welche Temperatur das CO₂ in der Atmosphäre hat, ist für den Sachverhalt "Erwärmung" prinzipiell belanglos, seine Temperatur beeinflusst nur die Größe von X. Zu Null wird X nur im theoretischen

Grenzfall, wenn (und solange) das CO₂ die gleiche Temperatur hat wie der umgebende Weltraum (dann ist die Gegenstrahlung des CO₂ gleich klein wie die des Weltraums).
Sowie das CO₂ sich aber (durch die Absorption von Strahlung) erwärmt, wird X endlich und die Gegenstrahlung erwärmt die Erde.

Anmerkung 1: Im theoretischen Grenzfall einer gegenüber dem Weltraum vollkommen isolierten Erde (Wärmeabfuhr Null) würde die Erde sogar die Temperatur der Sonne erreichen. Diese "Wärmeabfuhr Null" könnte - natürlich wieder nur theoretisch - z. B. durch ideale Spiegel erreicht werden, die alle Abstrahlung der Erde wieder zu dieser zurück reflektieren. Dementsprechend kann der reale THE in seiner Wirkung verglichen werden mit einem teildurchlässigen Spiegel, der einen Teil der Strahlen reflektiert und den Rest durchlässt (tatsächlich erfolgt beim THE nicht Reflexion, sondern Absorption und Re-Emission, aber in der Wirkung kommt das auf das Gleiche hinaus).

Anmerkung 2: Die beiden Ausdrucksweisen

- *"die Erde erwärmt sich, weil die Wärmezufuhr von der Sonne mit 100 % größer ist als die Wärmeabfuhr in den Weltraum mit (100 - X) %" und*
- *"die Erde erwärmt sich, weil sie nun zusätzlich zur Sonnenheizung von 100 % auch noch über die Gegenstrahlung mit X % beheizt wird",*

sind völlig gleichberechtigt. In beiden Fällen erhält die Erde X % mehr als sie abgibt, sie muss sich also erwärmen, solange, bis sie als Folge der höheren Temperatur um X % mehr abstrahlt als zuvor, dann sind Wärmezufuhr und Wärmeabfuhr wieder im Gleichgewicht.

Anmerkung 3: Von manchen Vertretern dieses Argumentes "*kalt kann warm nicht erwärmen*" wird gesagt, dass eine verbesserte Isolierung zwar die Abkühlung eines zunächst warmen, aber unbeheizten Körpers verlangsamen, nicht aber einen beheizten Körper erwärmen kann. Die Antwort auf die Frage, warum eine verbesserte Isolierung plötzlich wirkungslos wird, wenn der isolierte Körper beheizt wird, bleiben sie schuldig.

- c) *Die Erde steckt (mitsamt ihrer Atmosphäre) im Vakuum. Vakuum ist die beste Isolierung, CO₂ kann die Erde daher nicht besser isolieren und daher auch nicht erwärmen:* Das stimmt nicht. Wärme kann grundsätzlich auf 2 Wegen von einem Körper abgegeben werden: Durch körperlichen Kontakt zu einem anderen (kälteren) Körper (Leitung, Konvektion) und durch Strahlung. Vakuum unterbricht den körperlichen Kontakt, unterbindet daher jegliche Wärmeübertragung auf diesem Weg und ist für diesen Weg daher tatsächlich die beste Isolierung. Die (Wärme)Abstrahlung eines Körpers ist aber von dessen Umgebung unabhängig, sie erfolgt im Vakuum genau gleich wie gegenüber einem benachbarten oder sogar berührenden Körper. Im strengen Sinne ist eine Isolierung gegen

Wärmeabstrahlung nur durch Veränderung der Oberfläche des Körpers möglich, dahingehend, dass sie bei sonst gleichen Bedingungen weniger abstrahlt. Lassen wir die Oberfläche aber unverändert, strahlt der Körper bei gleicher Temperatur immer gleich viel ab, egal, wie seine Umgebung aussieht. Aber die abgestrahlte Energie kann (teilweise, theoretisch sogar vollständig) auf den Körper zurückgeführt werden, was in der Wirkung dann einer Verringerung der Abstrahlung bzw. einer "Isolierung gegen Strahlung" entspricht. Mit solch einer "Isolierung gegen Strahlung" kann dann auch tatsächlich eine bessere Wärmeisolierung als durch Vakuum erreicht werden. Die Möglichkeit der Rückführung abgestrahlter Energie durch Reflexion der Strahlen an einem Spiegel habe ich oben schon angegeben, ebenso, dass beim THE die Energierückführung durch Absorption eines Teiles der Strahlung im CO₂ und daraufhin zur Erde ausgesandte "Gegenstrahlung" erfolgt. Beim THE erfolgt tatsächlich eine bessere Isolierung als durch Vakuum.

- d) *Die Gegenstrahlung kann die Erde nicht erwärmen, weil die in der Gegenstrahlung steckende Energie schon von der Erde kommt:* Stimmt nicht, die Photonen der Gegenstrahlung kennen ihre Geschichte nicht, sie haben Energie und wenn sie absorbiert werden, wird diese Energie auf den absorbierenden Körper übertragen (Energieerhaltungssatz!), egal, woher die Photonen stammen und woher sie ihre Energie haben, Strahlenabsorption ist immer Energiezufuhr. Auch beim obigen Beispiel mit dem teilweise oder vollständig reflektierenden Spiegel stammt die Energie der vom Spiegel reflektierten Strahlen von der Erde. Aber das ist - wie gesagt - egal, und wenn man es genau nimmt, stammt die Energie ohnehin nicht von der Erde, sondern von der Sonne, aber auch das ist egal.
- e) *Gegenstrahlung transportiert keine Wärme:* Geringfügig andere Formulierung des zuletzt genannten Argumentes, genauso falsch. "Gegenstrahlung" ist nur eine Name, sie unterscheidet sich physikalisch nicht von "anderer" Strahlung. Strahlung ist immer Energietransport und wenn Strahlung absorbiert wird, bedeutet das immer Energieaufnahme des absorbierenden Körpers. Ob der sich dann auch erwärmt, hängt ausschließlich von seiner Gesamtenergiebilanz (genauer: Leistungsbilanz) ab: Ist die positiv, erwärmt er sich, ist sie negativ, kühlt er sich ab. In die Gesamtenergiebilanz geht die durch die Strahlungsabsorption aufgenommene Energie (genauer: Leistung) immer positiv ein. War vorher Gleichgewicht und kommt dann noch (zusätzliche) Strahlungsabsorption hinzu (egal, ob "Gegenstrahlung" oder irgend eine andere Strahlung), muss der Körper sich erwärmen (Achtung, wenn Phasenübergänge stattfinden - z. B. Verdampfung - kann die Temperatur eines Körpers trotz unausgeglichener Energiebilanz so lange konstant bleiben, bis der Phasenübergang für die gesamte dafür verfügbare Masse abgeschlossen ist, dann erst ändert sich die Temperatur entsprechend der Energiebilanz).

- f) *Leistungen darf man nicht addieren*: Falsch. Temperaturen darf man nicht addieren, Leistungen aber sehr wohl. Beispiel: In einem Ruderboot werden selbstverständlich die Leistungen aller Ruderer addiert. Sonst würde ein Achter genauso schnell weiter fahren, wenn 7 aufhören zu rudern und nur der Stärkste weiter macht.
- g) *Gegenstrahlung existiert nicht*: Dieses Argument gibt es in 2 Versionen: Manche bestreiten, dass CO₂ Strahlen aussendet. Das ist aber durch zahlreiche Labormessungen belegt. Solange keine neuen, gegenteiligen Messungen vorliegen, kann das Argument übergangen werden.

Nach der zweiten Version würde der 2. Hauptsatz die Gegenstrahlung verbieten, weil Wärme nur von warm nach kalt gehen kann, wir sind also eigentlich wieder beim Argument ganz oben. Wie aber dort schon gesagt, gilt der 2. Hauptsatz nur netto, nach ihm darf sehr wohl Strahlung zwischen 2 Körpern hin und her gehen, es muss nur immer mehr Strahlung vom warmen zum kalten Körper gehen als umgekehrt. Das Hin- und Hergehen von Strahlung ist sogar physikalisch vorgeschrieben, da das Aussenden von Strahlung eine unmittelbare Eigenschaft eines jeden Körpers ist und nur von dessen Temperatur (und Materialbeschaffenheit) abhängt und nicht von seiner Umgebung. Der Körper weiß gewissermaßen nicht, was in seiner Umgebung ist, er sendet seine Strahlung sozusagen blind aus, in alle Richtungen gleich, auch von kalt in Richtung warm. Man kann zwar mathematisch die beiden entgegen gerichteten Strahlungen "warm zu kalt" und "kalt zu warm" zu einer "Netto-Strahlung" zusammenfassen, aber physikalisch sind beide Strahlungen existent.

Schließlich wurde die Gegenstrahlung der Atmosphäre zur Erde auch schon gemessen. Gegenstrahlung existiert daher eindeutig.

- h) *Von der Gegenstrahlung des CO₂ kommt nichts auf der Erdoberfläche an, weil die unteren Luftschichten gravitationsbedingt so dicht sind, dass sie bei der vorhandenen CO₂-Konzentration für diese Strahlung undurchlässig sind (kurze Absorptionsweglänge), CO₂ kann daher die Erde nicht erwärmen*: Falsch, das "Nichts Ankommen" stimmt ganz einfach nicht, CO₂-Moleküle aus unteren Schichten können selbstverständlich auch direkt zur Erdoberfläche strahlen (Entfernung < Absorptionsweglänge!), und Gegenstrahlung aus höheren Schichten wird unterwegs absorbiert, erwärmt also die niedrigeren Schichten, sodass diese dann umso stärker strahlen und die Energie damit indirekt zur Erde kommt.

Anmerkung: Die Sättigung der Absorption in den Hauptbanden ist allerdings für die Stärke des THE wesentlich, weil mehr CO₂ in diesen Spektralbereichen zu keiner erhöhten Absorption führen kann. Der durch das CO₂ verursachte THE wächst daher nicht linear mit der CO₂-Konzentration, sondern nur so, dass die Erwärmung bei jeder Verdopplung der CO₂-Konzentration konstant bleibt. Bei einem Ausgangsniveau von beispielsweise 100 ppm (parts per million, Millionstel Volumenprozent) wirkt jedes

zusätzliche ppm daher etwa 4 Mal so stark wie beim heutigen Ausgangsniveau von 400 ppm, und wenn wir einmal 800 ppm haben sollten, wird die spezifische Erwärmungs-Wirkung des CO₂ nochmals halbiert.

- i) *Es gibt keinen experimentellen Nachweis des THE:* Dies Argument gibt es wieder in 2 Varianten: Erstens sind die diversen Laborexperimente, die immer wieder als Nachweis für den THE angeboten werden, angeblich alle nicht wirklich beweiskräftig. Streng genommen ist das höchstwahrscheinlich sogar richtig, es sollte meines Erachtens aber nicht überbewertet werden, siehe Anmerkung 1. Auf der anderen Seite ist die physikalische Berechtigung der in Kapitel 2 angegebenen 4 Einzelprozesse des THE durch zahlreiche Experimente sehr gut abgesichert. Genügt das nicht? Außerdem kann man die Temperatur der Erde einigermaßen gut messen und die ist deutlich höher, als sie ohne THE sein dürfte (weit außerhalb der Fehlergrenzen, siehe weiter unten, "natürlicher THE"). Auch das sollte eigentlich genügen, den THE als "brauchbare Arbeitshypothese" anzunehmen (auch dazu gleich noch etwas mehr).

Zweitens wird gesagt, dass die immer wieder als "Beleg" für den THE ins Feld geführte beobachtete Korrelation zwischen atmosphärischer CO₂-Konzentration und Temperatur viel zu schlecht ist, um als Beleg gelten zu können. Das stimmt sicher, ein paar Informationen hierzu werde ich noch bringen (Kapitel 7). Allerdings muss ich anmerken, dass eine gewisse Korrelation sich auch nicht abstreiten lässt und dass eine "oft schlechte" Korrelation zwar die Existenz anderer und zum Teil auch stärkerer Einflüsse auf das Klima fordert und einen "sehr großen" Einfluss des CO₂ ziemlich zuverlässig ausschließt, aber eben nur einen sehr großen Einfluss und keinesfalls jeglichen Einfluss, einen "moderaten" Einfluss kann es durchaus geben. Mehr lässt sich meines Erachtens aus den beobachteten Verläufen von CO₂-Konzentration und Temperatur nicht herauslesen.

Anmerkung 1: Nach Popper kann eine Theorie generell nicht bewiesen werden, sie kann nur allenfalls falsifiziert werden. Alle Experimente können den THE daher nicht wirklich beweisen (auch die o. g. Laborexperimente nicht), sie können ihn nur nahelegen (was sie m. E. auch sehr wohl tun, vielleicht nicht unbedingt die zitierten Laborexperimente, auf jeden Fall aber die Experimente zu den genannten 4 Einzelprozessen im THE und die generelle Temperaturmessung auf der Erde). Die Forderung nach einem experimentellen Beweis des THE ist daher einerseits schon weitgehend erfüllt und andererseits sind weitergehende Forderungen aus erkenntnistheoretischen Überlegungen heraus problematisch. An ihre Stelle sollte eine Forderung nach einer experimentellen Widerlegung des THE treten, nur so kann der Streit eindeutig entschieden werden. Ich kenne keinen Vorschlag für ein solches Experiment.

Zusatz für "Insider", die das "Wood'sche Experiment" aus dem Jahre 1909 kennen oder zumindest immer wieder hören, dass es den THE "widerlegen" würde: Dieses Experiment (und alle seine späteren Nachahmungen) sind m. E. viel zu ungenau, um

irgendetwas über den THE aussagen zu können. Sie bestätigen nur, dass bei einem sonnenbeschienenen, mit einem durchsichtigen Deckel verschlossenen Pappkarton die Unterbindung des Luftaustausches mit der Umgebung wirksamer ist als die Gegenstrahlung des Glasdeckels (was nach unserem generellen Verständnis der Verhältnisse bei einem Treibhaus nicht weiter überraschend ist). Alle weiteren Aussagen aus diesen Experimenten sind m. E. nicht mehr als Kaffesatz-Lesen.

Anmerkung 2: Wenn man Popper folgt, ist auch der immer wieder erhobene Vorwurf, die THE-Bejager würden die Beweislast unzulässig umkehren, hinfällig. Nach Popper kann eine plausible Theorie so lange als "brauchbare Arbeitshypothese" angesehen werden, bis sie falsifiziert ist, die Beweislast liegt im Falsifizieren des THE, nicht in seiner Bestätigung.

Alle hier diskutierten Argumente gegen die Existenz eines wie oben definierten THE scheinen mir eindeutig nicht stichhaltig zu sein. Natürlich werden auch noch andere Argumente vorgebracht, aber für die gilt das Gleiche: Ich habe keines finden können, das den THE wirklich in Zweifel zieht. Ihn grundsätzlich in Abrede zu stellen, scheint mir klar der Physik zu widersprechen.

Aber auf ein weiteres Argument gegen den THE möchte ich doch noch kurz eingehen: Gegen diesen wird manchmal vorgebracht, dass die Verhältnisse in der Atmosphäre zu komplex seien, um eine gesicherte Aussage über eine Erwärmung durch CO₂ machen zu können. Ich möchte daher ein Gedankenexperiment vorschlagen, bei dem dieses Problem wenigstens teilweise umgangen werden kann: Denken wir uns die Erde in 1000 km Abstand vollständig mit einem Glasdach umhüllt. Dieses sei so beschaffen, dass es alle Strahlung, die von außen zur Erde herein kommt, praktisch ungehindert durchlässt, die Infrarot-Abstrahlung der Erde aber zu einem erheblichen Teil absorbiert. Dieses Glasdach ist weit außerhalb der Atmosphäre, beeinflusst diese also zunächst überhaupt nicht. Aber die strahlungsbedingten Effekte funktionieren hier natürlich genauso: Die Absorption der Infrarot-Strahlen der Erde erwärmt das Glas und dieses sendet dann seinerseits Infrarot-Strahlen aus, etwa die Hälfte in Richtung Erde. Es gibt also auch hier die Gegenstrahlung und diese muss (zusammen mit der unveränderten Sonne) die Erde erwärmen, die - genauso wie ihre Atmosphäre - ansonsten noch nichts von der Existenz des Glasdaches gemerkt hat. Zusätzliche Effekte, wie z. B. verstärkte Verdunstung von Wasser auf der Erdoberfläche oder veränderte Strömungsverhältnisse in der Atmosphäre etc., treten erst als Folge dieser Erwärmung auf, sie können die Erwärmung der Erdoberfläche verstärken oder abschwächen, aber nicht aus der Welt schaffen. Die Komplexität der Atmosphäre erschwert eine Aussage über die Größe der Erwärmung durch den THE (siehe auch weiter unten), nicht aber über deren prinzipielle Existenz.

Anmerkung: Statt des rundum geschlossenen Glasdaches in 1000 km Entfernung können wir uns auch einen zweiten Körper denken, der außerhalb der Erdatmosphäre im Erdschatten angebracht wird. Dieser Körper erhält nur durch die Infrarot-Abstrahlung der

Erde Energie und muss (im Gleichgewicht) gleich viel Energie abstrahlen wie er bekommt, einen Teil davon strahlt er auch zur Erde ab. Diese muss sich dadurch erwärmen, ganz gleich wie im Falle einer Erhöhung der Sonneneinstrahlung, auch wenn die Vorgänge in ihrer Atmosphäre noch so komplex sind.

4. Verstärkung oder Abschwächung

Nach dem physikalischen Prinzip des THE lässt sich seine Größe relativ leicht näherungsweise berechnen. Dabei muss man noch zwischen dem "natürlichen THE" und dem "anthropogenen THE" unterscheiden: Der "natürliche THE" ist die Differenz zwischen der (gemessenen) Temperatur der realen Erdoberfläche (man hat sich darauf geeinigt, die Lufttemperatur in 2 m Höhe über dem Boden als repräsentativ dafür zu nehmen) und der (berechneten) Temperatur für den theoretischen Fall einer Erde ohne Atmosphäre bzw. ohne Treibhausgase in der Atmosphäre. Ohne auf Probleme bei der Ermittlung dieser Differenz (Rechnung, Messung, Mittelwertbildung) einzugehen, beträgt diese Differenz mindestens etwa 33 °C, auf jeden Fall aber weit mehr, als alle Ungenauigkeiten ausmachen. Es kann kein Zweifel daran bestehen, dass es ohne (natürlichen) THE empfindlich kalt auf der Erde wäre, der (natürliche) THE scheint sogar eine Voraussetzung für unsere Existenz als höher entwickelte Wesen zu sein. Von den Gegnern des THE habe ich keine überzeugende Erklärung gefunden, warum es auf unserer Erde so schön gemütlich warm ist. Ohne "Isolierung" der Erde durch Treibhausgase kann die Sonne alleine die etwa +15 °C globale Mitteltemperatur nicht aufrecht erhalten.

Zwischenbemerkung 1: Wenn der "natürliche THE" real ist, wäre eine weitere Erwärmung durch Erhöhung der Konzentration des CO₂ (oder anderer Treibhausgase) nicht überraschend, aber gesichert ist das natürlich nicht. Ich werde weiter unten nochmals darauf zurück kommen.

Der "anthropogene THE" ist nun - wenn es ihn denn gibt - genau diese "weitere Erwärmung" durch zusätzliche (anthropogene) Freisetzungen (Konzentrationserhöhungen) von Treibhausgasen. Quantifiziert wird diese Erwärmung üblicherweise durch Angabe der "Klimasensitivität" von CO₂: Diese gibt an, um wie viel sich die Erde (global und zeitlich gemittelte Lufttemperatur in 2 m Höhe) erwärmt, wenn die CO₂-Konzentration (gegenüber dem vorindustriellen Wert) verdoppelt wird. Wenn man nur das CO₂ betrachtet (ohne die Überlappung seiner Wirkungen mit den Wirkungen von anderen Treibhausgasen [insbesondere Wasserdampf] und unter der Annahme, dass sonst alles unverändert gleich bleibt), lässt sich auch die Klimasensitivität relativ leicht berechnen: Sie beträgt dann etwa 1 °C. In der Folge werde ich dies als die "Strahlungs-Klimasensitivität" S_0 bezeichnen (Erklärung kommt gleich). Der angegebene Wert von 1 °C ist meines Erachtens - soweit man überhaupt einen THE als existent anerkennt - weitgehend unumstritten, sagt aber noch nicht viel aus, weil es real eben diese Überlappungen und auch viele Folge-Änderungen in der Atmosphäre gibt, die Auswirkungen auf die Erwärmung haben können. Erst die

Summenwirkung ist entscheiden, ob uns der (anthropogene) THE weh tut, weil er zu stark ist, oder nicht, weil er dafür zu schwach ist (der natürliche THE tut uns - wie dargelegt - wohl auf jeden Fall gut; ein schwacher anthropogener THE tut uns vielleicht auch gut). Und bei dieser Summenwirkung, da scheiden sich die Geister, auch derjenigen, die den THE prinzipiell als real anerkennen.

Zwischenbemerkung 2: Was ich oben als "Erwärmung durch Absorption von Infrarot-Strahlung" beschrieben habe, sind reine Strahlungs-Effekte: Infrarot-Abstrahlung der Erde wird von Treibhausgasen absorbiert, Gegenstrahlung wird zur Erde zurück emittiert und die Erde wird von dieser (zusammen mit der Sonnenstrahlung) erwärmt. Ich habe oben gesagt, dass dieser Prozess üblicherweise als "Treibhauseffekt" bezeichnet wird. Hier habe ich jetzt vom "natürlichen" und vom "anthropogenen" Treibhauseffekt gesprochen und ich habe diese deutlich anders definiert, nämlich als "gesamte Temperaturdifferenz zwischen zwei definierten Zuständen auf der Erde" ("mit" und "ohne" Treibhausgase, bzw. mit "normaler" und mit "anthropogen erhöhter" Treibhausgas-Konzentration). Bei dieser "gesamten Temperaturdifferenz" werden alle Folgen der unterschiedlichen Treibhausgas-Konzentrationen berücksichtigt (siehe gleich), nicht nur die reinen Strahlungseffekte. In der Literatur werden beide Definitionen des "Treibhauseffektes" verwendet, wild durcheinander, meist ohne anzugeben, welche denn gerade gemeint ist. Dadurch wird die Diskussion nicht immer erleichtert.

Im Folgenden werde ich zweierlei zeigen: Erstens, dass es bei den "reinen Strahlungswirkungen" Überlappungen (der Wirkungen verschiedener Treibhausgase) sowie zahlreiche Folgen in Form von Verstärkungs- und Abschwächungs-Mechanismen gibt, die die Größe des Effektes verändern, und zweitens, dass die Treibhausgase auch noch andere Effekte bewirken, unabhängig von der Absorption der Infrarot-Abstrahlung der Erde. Wir müssen also eigentlich 3 abgestufte Definitionen bzw. Wirkungen unterscheiden:

- Erstens die reinen Strahlungswirkungen aufgrund der Absorption von Infrarot-Strahlung in CO₂ (oder anderen Treibhausgasen), also das, was ich bisher als "THE" bezeichnet und beschrieben habe. Im Folgenden werde ich dazu "Strahlungs-THE" sagen, bzw. bei der Klimasensitivität werde ich von "Strahlungs- Klimasensitivität" sprechen,
- zweitens die Veränderung dieser Wirkungen durch gegenseitige Überlappungen (bei mehreren Treibhausgasen) und durch Verstärkungs- und Abschwächungsmechanismen, die sich als Folge der Erwärmung einstellen. Daraus ergeben sich dann die Gesamtwirkungen, die auf der realen Erde als Folge der Infrarot-Absorption in den Treibhausgasen eintreten. Im Folgenden werde ich dazu "verstärkter THE" (bzw. "verstärkte Klimasensitivität") sagen, auch wenn es real ein abgeschwächter THE bzw. eine abgeschwächte Klimasensitivität sein kann, siehe gleich, und

- drittens die (zusätzlichen) Wirkungen von CO₂, unabhängig von der Absorption der Infrarot-Strahlung (die, wie wir sehen werden, auch Kühlwirkungen sein können).

Die tatsächliche Gesamtwirkung ist dann eine Überlagerung aller 3 Wirkungen (dazu könnte man dann "Gesamt-THE" sagen).

Die Überlappung mit anderen Treibhausgasen (insbesondere Wasserdampf) reduziert notwendigerweise die Wirkung des CO₂, weil in anderen Treibhausgasen absorbierte Photonen für das CO₂ nicht mehr zur Verfügung stehen. Nur, wie stark diese Reduzierung (bei der gegenwärtigen Konzentration der verschiedenen Treibhausgase) ist, das ist umstritten. Hinzu kommen vor allem aber noch zahlreiche Änderungen, die als Folge der Erwärmung durch den Strahlungs-THE eintreten und den Strahlungs-THE entweder verstärken oder abschwächen. Im Falle der Verstärkung spricht man von einer "Rückkopplung", im Falle der Abschwächung von einer "Gegenkopplung".

Ein Beispiel für so einen Folge-Mechanismus ist die verstärkte Verdunstung von Wasser als Folge einer Erwärmung: Dadurch kommt mehr Wasserdampf in die Atmosphäre. Der zusätzliche Wasserdampf reduziert einerseits die Treibhaus-Wirkung des CO₂, weil er dem CO₂ zusätzliche Photonen wegnimmt (stärkere Überlappung), doch ist er andererseits selbst ein starkes Treibhausgas mit ausgeprägter Infrarot-Absorption, sodass die Gesamtwirkung der erhöhten Wasserdampfkonzentration auch eine Verstärkung der CO₂-Wirkung sein kann. Aber mehr Wasserdampf in der Atmosphäre bewirkt noch mehr: Er führt vor allem zu mehr Wolken und die können sowohl kühlend wirken (durch Verringerung der Sonneneinstrahlung auf die Erde) als auch erwärmend (durch Behinderung der Infrarot-Abstrahlung von der Erde). Welche Wirkung des Wasserdampfes insgesamt überwiegt, ist heftig umstritten. Es ist dies wahrscheinlich der wissenschaftlich am stärksten umstrittene Einzelpunkt in der ganzen Klimadebatte.

Zwischenbemerkung 3: die "offizielle Klimawissenschaft" geht von einer insgesamt erheblichen Verstärkung durch den Wasserdampf aus. Nur auf Basis dieser Annahme kommt sie zu gravierenden Konsequenzen bei fortgesetzten CO₂-Freisetzungen. Wenn es umgekehrt keine große Wasserdampf-Verstärkung gibt, gibt es höchstwahrscheinlich auch keine katastrophale Erwärmung. Nach meinem Verständnis handelt es sich hier um den Dreh- und Angelpunkt der gesamten Klimadiskussion, der zwischen "harmloser Verschiebung" und "möglicherweise katastrophalen Änderungen" entscheidet. Hier besteht meines Erachtens noch erheblicher Forschungsbedarf.

Ein anderer Folge-Mechanismus der (strahlungsbedingten) Erwärmung ist mehr Regen und weniger Schnee im Niederschlag, kombiniert mit verstärktem Abtauen von Schnee und Eis auf der Erdoberfläche. Dadurch wird weniger Sonnenstrahlung in den Weltraum reflektiert und mehr absorbiert, die Erwärmung wird also wieder verstärkt.

Es gibt zahlreiche solche Folge-Mechanismen, die teilweise die strahlungsbedingte Erwärmung verstärken und teilweise abschwächen. Von allen kennt man ihre Größe nicht genau, oft weiß man sogar nicht einmal sicher, ob sie überhaupt verstärkend oder abschwächend wirken.

Überlappungen (mit anderen Treibhausgasen) und Folge-Mechanismen (Folgen der Erwärmung, die durch die Absorption von Infrarot-Abstrahlung der Erde bewirkt wird) lassen sich zu einer insgesamt gegebenen Verstärkung oder Abschwächung der "Strahlungs-Klimasensitivität" (siehe oben) um einen Faktor F zusammenfassen: In der einfachsten mathematischen Form lässt sich die "verstärkte Klimasensitivität" S (die natürlich auch eine abgeschwächte Klimasensitivität sein kann) dann als Produkt der "Strahlungs-Klimasensitivität" und dieses Verstärkungsfaktors beschreiben: $S = S_0 \times F$, wobei F eine Zahl zwischen null und unendlich ist. Ist $F > 1$, findet insgesamt Verstärkung statt, ist $F < 1$, Abschwächung.

Man erkennt sofort, dass Überlappung und Folge-Mechanismen den Strahlungs-THE nicht aufheben oder sein Vorzeichen umkehren können (was aber trotzdem immer wieder behauptet wird). Die Klimasensitivität des CO_2 (bzw. der THE) bleiben auch mit Überlappung und Folge-Mechanismen positive endliche Größen. Wie groß die "verstärkte Klimasensitivität" und damit die Erwärmung bei CO_2 -Verdopplung auf der realen Erde ist, ist ungewiss, aber es gibt auf jeden Fall eine Erwärmung, der THE lässt sich nicht ohne Verstoß gegen Physik oder Denkgesetze abstreiten. Das Verschwinden der Erwärmung oder gar eine Umwandlung in eine Abkühlung können prinzipiell nur dadurch ermöglicht werden, dass CO_2 neben dem auf der Infrarot-Absorption beruhenden (und immer erwärmenden!) "verstärkten THE" auch noch einen weiteren Effekt bewirkt, der abkühlend wirkt. Wenn ein solcher "kühlender Effekt" tatsächlich existiert, wirkt er dem "verstärkten THE" entgegen, er wirkt sich daher auf jeden Fall zumindest reduzierend auf die Erwärmung aus. Falls er den "verstärkten THE" gerade aufhebt, hat CO_2 insgesamt keinen Einfluss auf die Temperatur, wenn er ihn überkompensiert, wirkt CO_2 insgesamt sogar kühlend.

Im Folgenden werde ich zeigen, dass es höchst wahrscheinlich tatsächlich einen solchen zusätzlichen Effekte des CO_2 gibt und ich will ihn kurz beschreiben. Ich möchte aber schon vorab anmerken, dass ein Effekt, der den "verstärkten THE" immer und überall gerade genau kompensiert, beliebig unwahrscheinlich ist. Von den eingangs bei der "Problemstellung" aufgezählten 4 verschiedenen Meinungen zum Einfluss des CO_2 auf das Klima können wir daher die Meinung "keinen Einfluss" nach dem bisher Gesagten bereits ausschließen. Das CO_2 hat zwingend einen Einfluss, es kann stark erwärmen (möglicherweise sogar katastrophal stark), nur schwach erwärmen (möglicherweise sogar vorteilhaft für uns), und es kann eventuell sogar abkühlen (unbedeutend wenig oder schmerzlich stark). Die Abkühl-Möglichkeit wollen wir jetzt weiter untersuchen.

5. Kühlung durch Emission von Infrarot-Strahlung

Wir suchen also nach einem zweiten Effekt des CO₂, über den es kühlt (neben dem über die Absorption der Infrarot-Abstrahlung der Erde, über den es wärmt). Wie jeder Körper, der Strahlung absorbiert, kann CO₂ auch Strahlung emittieren. Das tut es umso stärker, je wärmer es ist. So, wie die Absorption von Strahlung immer eine Energiezufuhr ist, ist die Emission von Strahlung immer eine Energieabfuhr. In einer Atmosphäre mit CO₂ (allgemeiner: mit Treibhausgasen) finden daher immer Energiezufuhr und Energieabfuhr statt. Dabei gilt natürlich weiterhin, dass für die Temperaturentwicklung eines Körpers (bei der Atmosphäre für die Temperaturentwicklung in einem bestimmten Bereich von ihr) seine Gesamt-Energiebilanz entscheidend ist. Weil unter der Atmosphäre die warme Erde stark strahlt und über ihr der kalte Weltraum praktisch nicht strahlt, überwiegt in den unteren Schichten der Atmosphäre die Absorption und in den oberen Schichten die Emission. Die unteren Schichten werden also durch das CO₂ erwärmt, die oberen werden abgekühlt, CO₂ wärmt und kühlt daher gleichzeitig und es führt dabei zu einer Temperaturspreizung in der Atmosphäre: Unten warm, oben kalt. Die Abkühlung der oberen Atmosphäre ist eine zwingende Begleiterscheinung des Strahlungs-THE und kein zusätzlicher, davon unabhängiger Effekt. Da sie zwangsweise von einer Erwärmung der unteren Atmosphäre begleitet ist, ist sie kein Kühleffekt für die Erde.

Anmerkung: Manchmal wird die Temperaturschichtung der Atmosphäre (unten warm, oben kalt) als Folge des Zusammendrückens der unteren Luftschichten durch die Gravitation erklärt. Das scheint mir aber nicht stichhaltig zu sein. Ohne die Möglichkeit der Wärmeabgabe aus den oberen Schichten in den Weltraum (realisiert durch die Abstrahlung von Treibhausgasen) kann die Gravitation alleine auf Dauer keinen negativen Temperaturgradienten in der Atmosphäre aufrecht erhalten (warme Luftpakete steigen auf, stabil wäre höchstens eine Schichtung oben warm und unten kalt).

Noch ein weiterer Punkt ist zu diskutieren: Von manchen THE-Kritikern wird vorgetragen, dass mit CO₂ in der Atmosphäre die in den Weltraum abstrahlende Fläche vergrößert würde ("Erde + Atmosphäre" gegenüber "Erde alleine") und somit, um die Übertragungsleistung konstant zu halten, die Temperatur der abstrahlenden Fläche und damit auch die Temperatur der Erdoberfläche niedriger werden müssten, CO₂ würde daher auf diesem Wege die Erde kühlen. Aber erstens wäre ein solcher Effekt bei einer Schichtdicke der "dichten" Atmosphäre von meinetwegen einigen 10 Kilometern und einem Erddurchmesser von über 13000 Kilometern ohnehin nur vernachlässigbar klein und zweitens strahlt die Atmosphäre vor allem aus den oberen Schichten in den Weltraum ab und diese werden, wie dargelegt, durch die THE-bedingte Temperaturspreizung in der Atmosphäre kälter, sodass zum Ausgleich die "restliche" Abstrahlung (insbesondere die von der Erdoberfläche) von höherer Temperatur aus erfolgen muss. Dieser Effekt überwiegt den der Flächenvergrößerung bei weitem. So kann kein Kühleffekt für die Erdoberfläche entstehen.

Noch ein dritter Effekt wird häufig angeführt: Dazu schauen wir uns zunächst noch einmal den Weg der Energie an: Diese wird von der Sonne durch die Atmosphäre zur Erde transportiert und dann von der Erde zurück durch die Atmosphäre nach außen in den Weltraum. Dass auf diesem Rückweg ein Teil der Energie vom CO₂ in der Atmosphäre abgefangen und von diesem Teil dann nur etwa die Hälfte doch noch in den Weltraum abgestrahlt, die andere Hälfte aber zur Erde zurück gestrahlt wird, haben wir schon gesehen, das ist ja gerade der (Strahlungs-)THE. Aber was das CO₂ auf dem "Rückweg" der Energie macht, das macht es bis zu einem gewissen Grad auch schon auf dem "Hinweg" der Energie: Es absorbiert einen Teil der hereinkommenden Sonnenstrahlung. Und mit dieser Energie geschieht nun wieder genau das Gleiche: Sie wird vom CO₂ etwa zur Hälfte in den Weltraum und zur Hälfte zur Erde abgestrahlt. Was in den Weltraum geht, wird der Erde - im Vergleich zu "kein CO₂ in der Atmosphäre" - vorenthalten. Das ist zweifelsfrei eine Kühlung und es wird auch immer wieder als Argument gegen eine Erwärmung durch CO₂ vorgebracht. Aber infolge der Wellenlängenverteilung der Sonnenstrahlung und der optisch asymmetrischen Eigenschaften des CO₂ ist dieser so der Erde vorenthaltene Teil der Energie sehr viel kleiner als der durch Absorption der Erdatstrahlung im CO₂ zur Erde zurückgeführte Teil der Energie. Er kann den Strahlungs-THE daher nicht annähernd kompensieren, es ist prinzipiell berechtigt, ihn in erster Näherung zu vernachlässigen.

Mit den bisher vorgetragenen Argumentationen wird die Frage einer Kühlung durch CO₂ meistens abgetan: Es gibt sie nicht, bzw. so gut wie nicht, jedenfalls nicht für die Erdoberfläche. Ich gestehe, mir hat das lange Zeit genügt. Bei genauerem Hinsehen sind mir im Wirrwarr unterschiedlicher, oft haltloser Meinungen zum THE dann aber doch einige Argumente aufgefallen, die Zweifel am Ausschluss einer Kühlung rechtfertigen. Auf dem Rückweg der Energie von der Erde durch die Atmosphäre in den Weltraum haben wir bisher nur den Strahlungstransport betrachtet (siehe oben). In einer strahlungsinaktiven Atmosphäre (keine Treibhausgase) gibt es auch nur diesen Transportweg für Energie nach außen. Wärme, die über Leitung und Konvektion sowie als latente Wärme (Verdunstung) von der Erde in die Atmosphäre eingebracht wird, bleibt (ohne Treibhausgase) dort gewissermaßen stecken, weil sie nicht in den Weltraum abgegeben werden kann. Die Atmosphäre erwärmt sich einfach so lange, bis auf diesen Wegen netto keine Energie mehr an sie übertragen wird, dann tut sich nichts mehr. Es wird nur Strahlungsenergie an den Weltraum abgegeben, und die geht - ohne Treibhausgase - ausschließlich und vollständig direkt von der Erdoberfläche in den Weltraum.

Wenn aber Treibhausgase in der Atmosphäre sind, dann bewirken die, wie wir schon gesehen haben, durch das teilweise Abfangen dieser Strahlung die Erwärmung der Erde gemäß Strahlungs-THE (bzw., bei Berücksichtigung der Folge-Mechanismen, gemäß verstärktem THE). Aber sie bewirken noch ein Zweites, zusätzlich zu dieser Wechselwirkung mit der Erdatstrahlung: Sie ermöglichen auch, dass durch Leitung, Konvektion und Verdunstung in die Atmosphäre eingebrachte Wärme von dieser (per Strahlung) in den Weltraum abgegeben wird. Natürlich geht auch da gleich viel Energie (als "Gegenstrahlung") zurück zur Erde wie in den Weltraum, aber was in den Weltraum geht, ist ein zweiter Wärmeabfuhrpfad von der

Erdoberfläche in den Weltraum, in Ergänzung und unabhängig von der Infrarot-Abstrahlung der Erde, der ohne Treibhausgase in der Atmosphäre nicht vorhanden ist. CO₂ kühlt also tatsächlich, parallel zu seiner Erwärmung und zusätzlich zu dieser.

Die auf diesem Weg verursachte Kühlwirkung ist sicher umso stärker, je höher die CO₂-Konzentration in der Atmosphäre ist. Vermutlich ist der Zusammenhang zunächst linear. Bei höheren Konzentrationen könnte aber der Wärmeübergang von der Erdoberfläche in die Atmosphäre zum begrenzenden Faktor werden. Untersuchungen zur Abhängigkeit der Kühlwirkung von der CO₂-Konzentration sind mir nicht bekannt.

Anmerkung: Oben hatte ich das Gedankenexperiment mit dem geschlossenen Glasdach in 1000 km Entfernung angegeben und dargelegt, dass dieses Glasdach infolge seiner Infrarot-Absorption die Erde erwärmen muss. Denken wir uns nun, dass dieses Glasdach nicht frei schwebend ist, sondern sich über einige Pfeiler auf der Erdoberfläche abstützt. Auf den Infrarot-Pfad hat das keinen Einfluss. Wenn die Pfeiler aber aus sehr gut wärmeleitendem Material bestehen, dann gibt es noch einen zweiten Effekt: Über die Pfeiler wird Wärme von der Erde zum Glasdach geleitet. Die so erhaltene Wärme muss das Glasdach wieder abstrahlen, wie immer je zur Hälfte zur Erde und in den Weltraum. Mit den wärmeleitenden Pfeilern wirkt das Glasdach daher auch kühlend. Welcher Effekt überwiegt, hängt von den speziellen Gegebenheiten ab. Was hier die Wärmeleitung über die Pfeiler bewirkt, bewirken auf der realen Erde Leitung, Konvektion und Verdunstung von der Erde in die Atmosphäre.

6. Gesamtwirkung

Versuchen wir, alle Effekte zusammenzufassen: CO₂ lenkt die in der Gegenstrahlung des THE enthaltene Energie zur Erde zurück (Erwärmung), lenkt einen (kleinen) Teil der Energie der Sonnenstrahlen an der Erde vorbei in den Weltraum (minimale Kühlwirkung) und gibt einen Teil der durch Leitung, Konvektion und Verdunstung in die Atmosphäre eingebrachten Energie zusätzlich in den Weltraum ab (Kühlwirkung). CO₂ wärmt und kühlt also gleichzeitig. Die Gesamtwirkung hängt davon ab, ob und um wie viel die zurückgeführten oder die vorbei gelenkten + die zusätzlich abgegebenen Energiemengen (jeweils einschließlich Verstärkung oder Abschwächung durch Folge-Mechanismen) überwiegen. Eine gesicherte Quantifizierung ist schwierig. Im Bereich von null bis zu den natürlichen Treibhausgas-Konzentrationen scheint die Erwärmung eindeutig zu überwiegen (natürlicher THE), aber bei steigenden Konzentrationen (anthropogener THE) ist das unter Umständen nicht mehr zutreffend: Wie dargelegt, wird die Erwärmung durch Infrarot-Absorption im CO₂ infolge der Sättigung dieser Absorption in den Hauptbanden mit zunehmender CO₂-Konzentration immer langsamer, während die Kühlung durch Strahlungsabgabe eines Teils der durch Leitung, Konvektion und Verdunstung in die Atmosphäre eingebrachten Energie vermutlich proportional mit der CO₂-Konzentration zunimmt. Bei einer bestimmten Treibhausgaskonzentration könnte es daher durchaus auch zu einem Vorzeichenwechsel in der Gesamtwirkung kommen, bei welcher,

wissen wir nicht (jedenfalls ich weiß es nicht). Außerdem könnte sich irgendwann einmal auch der Wärmeübergangswiderstand von der Erdoberfläche zur Atmosphäre als begrenzend für den Kühleffekt herausstellen, dann gibt es möglicherweise doch keinen Vorzeichenwechsel, auch das wissen wir (weiß ich) nicht. Alle diese Einflüsse sollten wir m. E. intensiv und ergebnisoffen untersuchen, bevor wir über das weitere Vorgehen zum Klimaproblem entscheiden (siehe auch weiter unten).

Ein Weg, vorab wenigstens eine Plausibilitätsabschätzung des tatsächlichen Einflusses von CO₂ auf das Klima zu versuchen, besteht in der Betrachtung der historischen Entwicklung von CO₂ und Temperatur, dem wollen wir uns jetzt widmen.

7. Klimageschichte: Anthropogen verursachte Veränderungen erkennbar?

Ich möchte nicht auf das Stadt- und Landklima und andere, eindeutige anthropogene Einflüsse eingehen, sondern die "globale Erwärmung" seit Beginn der Industriellen Revolution betrachten. Was spricht dafür, dass diese vom Menschen verursacht ist, was spricht dagegen?

Im letzten Viertel des 20. Jahrhunderts war es deutlich wärmer geworden. Die durch die anthropogenen CO₂-Freisetzungen verursachte Erwärmung ist aus dem natürlichen Rauschen des Klimas herausgetreten und zum dominierenden und die weitere Entwicklung bestimmenden Faktor geworden, war um 2000 herum die weit verbreitete Ansicht. Auch mir erschien das damals plausibel. Aber seit 1998 ist es überraschenderweise nicht mehr wärmer geworden, obwohl die CO₂-Freisetzungen noch weiterhin stark zugenommen haben. Mittlerweile 15 Jahre Stagnation sind nach menschlichem Ermessen für eine rein statistische Schwankung zu lang, es gibt daher höchstwahrscheinlich eine physikalische Ursache für diesen Erwärmungsstopp, die stärker ist als die Beeinflussung durch die weiter steigende CO₂-Konzentration. Welches diese Ursache ist, wissen wir nicht. Soweit ich es sehe, hat die "offizielle Klimawissenschaft" keine Antwort auf diese Frage, lehnt aber die von anderer Seite gegebene Erklärung ab, das sei wahrscheinlich auf den Rückgang der Sonnenaktivität (weniger Sonnenflecken) zurück zu führen. Die dafür angegebene Begründung "zu schwach" kann mich nicht überzeugen, schon gar nicht, wenn man für die eigene Begründung der Dominanz des CO₂ als Klimatreiber auch auf einen Verstärkungsmechanismus (eben die Verstärkung über die Wasserdampfrückkopplung) angewiesen ist. Mit einem Verstärkungsmechanismus gibt es grundsätzlich kein "zu schwach", auch nicht für die Veränderung der Sonnenaktivität, man muss nur die Verstärkung hinreichend stark annehmen. Die Anhänger der Sonnen-Theorie tun das, ob sie damit Recht haben, wird die Zukunft zeigen.

Aber "Sonne oder nicht" und wie das ggf. funktioniert, ist ein anderes Thema. Kommen wir zurück zu den historischen Beobachtungen und betrachten wir das Problem einmal in etwas

größerem Rahmen: Das Klima hat sich immer schon verändert. Wenn es in den letzten 150 Jahren konstant geblieben wäre, wäre das sehr ungewöhnlich gewesen. Es ist bekanntlich nicht konstant geblieben, das Klima hat sich auch in dieser Zeit verändert. Na und, hat es sich denn ungewöhnlich verändert? Heute glaube ich, das mit Nein beantworten zu können, und ich werde diese Meinung nachfolgend auch begründen.

Die in der Geschichte zu beobachtenden Klimaänderungen scheinen zum Teil zyklischer Natur zu sein: In etwa 1000jährigem Zyklus war bzw. ist es warm (Optimum zur Römerzeit, mittelalterliches Optimum, heute), dazwischen war es deutlich kühler (Völkerwanderungszeit, Kleine Eiszeit). Die Ursachen für diese Änderungen sind nicht sicher bekannt, aber zweifelsfrei natürlich, der Mensch war damals wohl auf jeden Fall viel zu schwach, das Klima entscheidend zu beeinflussen. Zumindest seit etwa 1850 (seit dann haben wir detaillierte Aufzeichnungen) scheint diesem 1000jährigen Zyklus (genauer: Dem noch ansteigenden letzten Teil in diesem 1000jährigen Zyklus) ein etwa 60jähriger Zyklus überlagert zu sein: Es gab 3 Phasen mit Erwärmung (etwa 1860 bis 1878, 1911 bis 1944 und 1976 bis 1998) und dazwischen und danach 3 Phasen mit Stagnation bis leichter Abkühlung (1878 bis 1911, 1944 bis 1976 und seit 1998). Dieser (jedenfalls zu vermutende) 60jährige Zyklus wird möglicherweise durch Ozeanströmungen verursacht, aber auch das ist unsicher.

Die 3 genannten Erwärmungsphasen fallen in die Zeit ab Beginn der Industriellen Revolution, die auch zu einer drastischen Zunahme der anthropogenen CO₂-Freisetzungen geführt hat. Ist das Zufall, oder steckt da mehr dahinter? Jedenfalls unterscheiden sich die 3 Erwärmungsphasen einerseits nicht signifikant hinsichtlich Dauer und Gradienten, sie haben sich andererseits aber bei deutlich unterschiedlichen anthropogenen CO₂-Freisetzungsraten ereignet. Letztere sind allein im 20. Jahrhundert um mehr als den Faktor 10 gestiegen! Für die ersten beiden Erwärmungsphasen (1860 bis 1878 und 1911 bis 1944) kommen nach heutigem Wissen nur natürliche Ursachen in Frage. Wären die anthropogenen CO₂-Freisetzungen damals die dominierende Ursache für die Erwärmung gewesen, müssten die seither sehr viel stärker gewordenen Freisetzungen das Klima längst absolut und ohne jeden Zweifel dominieren. Das tun sie aber nachweislich der Entwicklung von 1944 bis 1976 und insbesondere nachweislich des Stopps der Erwärmung seit 1998 eindeutig nicht, trotz weiter stark steigender Freisetzungsraten.

Damit können wir die eingangs dieses Abschnittes gestellte Frage nach dem Für und Wider anthropogener Ursachen teilweise bereits beantworten: Bei den ersten beiden der insgesamt 3 Erwärmungsphasen seit Beginn der Industriellen Revolution spricht nichts für eine anthropogene Ursache, mehr noch, die anthropogene CO₂-Freisetzung kann so gut wie sicher als Ursache ausgeschlossen werden.

Wenn aber damals (für die ersten beiden Erwärmungsphasen) natürliche Ursachen maßgeblich waren, warum kann dann nicht auch die vorläufig letzte Erwärmungsphase (1976 bis 1998) hauptsächlich eine natürliche Ursache haben und das CO₂ nur eine untergeordnete Rolle spielen? Warum ist die seit 1850 zweifelsfrei zu sehende Erwärmung nicht überwiegend

einfach das Zurückschwingen des Klimas aus der (natürlich verursachten!) Kleinen Eiszeit in den Zustand davor (1000jähriger Zyklus!), wobei die Stufen in der Erwärmung durch den überlagerten 60jährigen Zyklus verursacht wurden? Zumindest für die ersten beiden Stufen scheint das zu stimmen, warum dann nicht auch für die letzte? Diese unterscheidet sich - wie schon gesagt - nicht signifikant von den beiden vorausgehenden Stufen. Die Annahme, dass für sie nur das CO₂ als Ursache in Frage kommt, scheint mir infolge der Gleichheit mit den (anderweitig verursachten!) Vorgänger-Stufen und infolge des mittlerweile eingetretenen Erwärmungsstopps bei steigender CO₂-Freisetzung heute nicht mehr plausibel zu sein. Wenn CO₂ jetzt (seit 1998) nicht dominierend ist und davor, 1944 bis 1976, nicht dominierend war, wieso soll es dann dazwischen, 1976 bis 1998, dominierend gewesen sein? Für das Nicht-Ansteigen der Temperaturen seit 1998 muss es eine Ursache geben, die die Wirkung des CO₂ zumindest kompensiert. Über diese Ursache ist nichts Näheres bekannt, ihr Wirken ist überraschend eingetreten. Kann dann nicht auch für die Erwärmung 1976 bis 1998 eine bisher nicht identifizierte Ursache maßgebend gewesen sein? Die Ursachenzuordnung für diese Erwärmung muss meines Erachtens auf jeden Fall neu hinterfragt werden.

In Summe zeigt sich, dass die ersten beiden Erwärmungsphasen seit Beginn der Industriellen Revolution höchstwahrscheinlich natürliche Ursachen gehabt haben und dass die Ursache der dritten Erwärmungsphase (1976 bis 1998) neu untersucht werden muss. Für CO₂ als deren Verursacher spricht die hohe anthropogene Freisetzung (mit vermutlich prinzipiell erwärmender Wirkung), dagegen spricht deren relative Unwirksamkeit in den Jahren davor und vor allem in den Jahren danach, sowie die begründete Vermutung, dass die beiden ganz ähnlichen vorausgehenden Erwärmungsphasen anderweitig verursacht worden sind.

Anmerkung 1: Manchmal wird gegen die Aussage "Erwärmungsstopp seit 1998" eingewendet, der Zeitraum sei für eine gesicherte Aussage zu kurz, hierfür wären mindestens 30 Jahre erforderlich. Natürlich ist eine Aussage über 30 Jahre zuverlässiger als eine über 15 Jahre, aber erstens ist es meines Erachtens unzulässig, 30 Jahre lang den Kopf in den Sand zu stecken und zwischenzeitliche Veränderungen nicht zu beachten, und zweitens erfüllt auch die vorangegangene Erwärmungsphase mit 22 Jahren (1976 bis 1998) das 30-Jahre-Kriterium nicht. Wenn man das Kriterium ernst meinte, müssten wir immer über längere Phasen integrieren und dann hätten wir zumindest seit dem 2. Weltkrieg keine starke Erwärmung gehabt! Wir sollten nicht mit zweierlei Maß messen.

Anmerkung 2: Der Erwärmungsstopp seit ca. 1998 zeigt m. E. nicht nur, dass es Klimaeinflüsse gibt, die (heute) mindestens gleich stark sind wie der des CO₂, sondern auch, dass die oben diskutierte mögliche Verstärkung der "Strahlungs-Klimasensitivität" von CO₂ nicht sehr groß sein kann, vielleicht sogar Abschwächung vorliegt.

8. Weiteres Vorgehen: Pause empfohlen

Zunächst 3 wesentliche Aussagen:

1. Klimaschutz ist ein wichtiges Thema, weil die Folgen von Klimaänderungen gravierend sein können.
2. Klimaschutz kostet Geld. Allein die EEG-Umlage zum Ausgleich der Mehrkosten für die "Erneuerbaren Energien" in Deutschland beträgt mittlerweile über 20 Milliarden €, pro Jahr! Bei 80 Millionen Einwohnern sind das 250 € pro Kopf, jährlich, mit stark steigender Tendenz! Andere Kostenkomponenten kommen noch hinzu, z.B. für den Netzausbau. Umweltminister Altmaier hat die Kosten der Energiewende mit 1000 Milliarden € angegeben!
3. Ob wir Klimaschutz wirklich brauchen, kann heute niemand gesichert sagen. Gemäß Physik kann CO₂ prinzipiell sowohl erwärmen als auch kühlen. Bei kleinen Konzentrationen scheint die Erwärmung klar zu dominieren (natürlicher THE), wie das im heutigen Zustand ist (anthropogener THE), wissen wir nicht. Seit 15 Jahren ist das CO₂ entweder wirkungslos, oder seine Erwärmungs-Wirkung wird durch unbekannte Einflüsse kompensiert. Viele Klimatologen erwarten mittlerweile, dass die stagnierenden Temperaturen auch noch für einige Jahre anhalten werden.

In dieser Phase der Unsicherheit sollten wir die Chance, die der Erwärmungsstopp uns bietet, auch tatsächlich beim Schopf ergreifen: Wir haben Zeit und weil das Klima eine Pause macht, sollten wir auch eine Pause einlegen, zum Nachdenken. In dieser Pause sollten wir versuchen, mehr Klarheit über die wahren Treiber für unser Klima bei den heutigen Verhältnissen zu bekommen. Dafür sollten wir Geld aufwenden, auch in wirtschaftlich schlechten Zeiten. Den massenhaften Ausbau unwirtschaftlicher Wind- und PV-Anlagen sollten wir aber in solchen Zeiten stoppen, für das Geld gibt es jetzt bessere Anwendungen. Bis zur Klärung der tatsächlichen Notwendigkeit sollten wir uns beim Klimaschutz auf "No-Regret-Maßnahmen" beschränken, d. h. auf Maßnahmen, die auch unabhängig vom Klimaproblem sinnvoll sind, oder, sofern es spezielle Klimaschutzmaßnahmen sind, auf solche, die für sich genommen wirtschaftlich sind und nicht noch zusätzliche Subventionen verlangen. In einigen Jahren können wir dann von voraussichtlich wesentlich besser gesicherter Grundlage aus entscheiden, ob wir weitergehende Klimaschutzmaßnahmen tatsächlich brauchen.

9. Zusammenfassung

CO₂ wärmt und kühlt gleichzeitig (durch die Absorption von Infrarot-Abstrahlung der Erde und teilweise Rückführung der Energie über "Gegenstrahlung", bzw. durch teilweise Abstrahlung anderweitig in die Atmosphäre eingebrachter Energie in den Weltraum). Eine gesicherte Aussage, welcher Effekt unter welchen Bedingungen überwiegt, kann meines Erachtens ohne weitere Forschungen nicht gemacht werden. Die historische Entwicklungen

von CO₂-Freisetzungen und Temperaturen seit dem Ende der Kleien Eiszeit rechtfertigen Zweifel am CO₂ als dominierendem Klima-Faktor. Der Erwärmungsstopp seit nunmehr 15 Jahren sollte uns Zeit für weitere Forschungen geben, bevor wir weitere Milliarden in eine vielleicht doch nicht notwendige Reduzierung der CO₂-Freisetzungen stecken.