

Antwort zum Anhörungsverfahren gem. § 79 der Geschäftsordnung des Thüringer Landtages

zum Thema: **Klimakiller Schwefelhexafluorid in Windkraftanlagen**

Zusammenfassung

- 1.) Für Schwefelhexafluorid (SF_6) wird hier auch SF_6 geschrieben. Der Begriff „Klimakiller“ wird vermieden, er entspricht nicht dem Sprachgebrauch der Physik. Stattdessen wird der Begriff „IR-aktives Gas“ verwendet, synonym der Begriff „Treibhausgas“. Wobei die Atmosphäre physikalisch nicht als ein Treibhaus mit Dach betrachtet werden kann.
- 2.) Schwefelhexafluorid (SF_6) findet vielseitige Verwendung, so z. B. in der Metallurgie, aber auch als Isoliergas in elektrischen Schaltanlagen wie z.B. in Windrädern. Jedoch beschränkt sich diese nicht nur auf Windräder. Denn es wären jegliche Hochspannungs-Anwendungen zu betrachten, so auch Konverter-Stationen von Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragungsleitungen (HGÜ). Die überwiegende Verwendung von SF_6 erfolgt im asiatisch-pazifischen Raum.
- 3.) Zu den produzierten Mengen von SF_6 und dem Entweichen in die Atmosphäre können hier keine Angaben gemacht werden. Dazu sollten Hersteller und Anwender Auskunft geben. Insofern seien die Fragen 1.- 14. zur Anhörung hier nicht im Detail beantwortet, sondern es seien grundlegende physikalische Gesichtspunkte zur Klima-Wirksamkeit von SF_6 , auch im Vergleich zu anderen IR-aktiven Gasen (wie H_2O und CO_2) betrachtet, da dies, zumindest eine qualitative, Abschätzung der Klimawirksamkeit von SF_6 ermöglicht. Eine physikalische Herleitung und Betrachtungen zur Klimaaktivität von SF_6 im Vergleich mit CO_2 (im Weiteren CO_2 genannt) erfolgt auf den Seiten 3 bis 10.
- 4.) Die Klimaaktivität von SF_6 erklärt sich nicht allein aus seinem um den Faktor 23.000-fach größeren Extinktionskoeffizient gegenüber CO_2 , sondern auch aus der Tatsache, dass die IR-Absorption von SF_6 weit entfernt ist von einer Sättigung. Dies ganz im Gegensatz zur Sättigung der IR-Absorption von CO_2 . Außerdem erfolgt die IR-Absorption durch SF_6 im Spektralbereich des „Atmosphärischen Fensters“, in einem Bereich der ungehinderten Infrarot-Abstrahlung in den Weltraum, der wesentlich zur Kühlung der Erde beiträgt. Deshalb ist SF_6 ein IR-aktives Gas, welches besondere Beachtung erfordert.
- 5.) Während die IR-Absorption von CO_2 in der Sättigung ist und selbst eine Verdoppelung von CO_2 kaum Einfluss auf die Temperatur hat, ist die zu erwartende Konzentration von SF_6 sehr weit von einer Sättigung der IR-Absorption entfernt, so dass eine jeweilige Verdoppelung von SF_6 , auch kleiner Konzentrationen, einen großen Einfluss hat.
- 6.) Während CO_2 ein Lebensgas für die Photosynthese der Pflanzen, und Voraussetzung für das Leben auf der Erde ist, hat SF_6 nur technische Anwendungen. CO_2 hat Senken nicht nur in der Biomasse (wie Bäumen), sondern vor allem im Meer, wo es seit Jahrmilliarden zur natürlichen Karbonat-Gesteinsbildung beiträgt. Zum Beispiel sind die Dolomiten in Südtirol oder der Muschelkalk im Saaletal gigantische Lager gebundenes CO_2 aus der Erdgeschichte. Für SF_6 fehlt jeglicher natürlicher Kreislauf. Im Folgenden werden die o. g. Punkte (1 bis 7) im Detail betrachtet.
- 7.) Es wird vorgeschlagen die Auswirkungen von SF_6 gem. den o. g. Einwänden durch ein Institut mit ausgewiesener Kompetenz in Optik und Spektroskopie, wie die Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) Braunschweig, quantitative berechnen zu lassen.

1. Einsatz von Schwefelhexafluorid (SF₆) – und seine Eigenschaften

Der Einsatz von Schwefelhexafluorid (SF₆), im Weiteren anhand der Summenformel „SF₆“ genannt, erfolgt in der Elektrotechnik aufgrund seiner physikalischen Eigenschaft als außergewöhnlicher elektrischer Isolator. SF₆ ist ein anorganisches, farbloses, nicht brennbares, infrarot-(IR)-aktives Gas. Sein Einsatz ist nicht auf Windkraftanlagen beschränkt, sondern erfolgt, wenn mit hohen elektrischen Spannungen auf kleinem Raum umgegangen werden muss. Da die Durchschlags-Spannung in trockener Luft 1 kV/cm beträgt, wären zur Isolation an spannungsführenden Teilen entweder große Abstände im Medium Luft, oder der Ersatz der Luft durch ein Isolator-Gas (als Dielektrikum) notwendig. Mit anderen Worten, gibt es einen elektrischen Überschlag (Funken, Lichtbogen), wenn bei einer Spannung von 1000 V (Volt) der Mindestabstand von 1 cm (Zentimeter) in Luft unterschritten wird. Das Isolationsvermögen der Luft verschlechtert sich mit zunehmender Luftfeuchte. Der Auslöser für einen Funkenüberschlag ist das Überschreiten der elektrischen Feldstärke, Maßeinheit V/m (Volt pro Meter) entsprechend dem Isolationsvermögens, respektive dem elektrischen Widerstand des Mediums (Maßeinheit Ω , Ohm) zwischen spannungsführenden Teilen. Ein idealer Isolator wäre ein Vakuum. Jedoch gibt es kein „ideales“ Vakuum, auch wäre der technische Aufwand viel zu groß, abgesehen von speziellen Anwendungen, wie z. B. bei Röntgenröhren. SF₆ hat sehr gute Isolationseigenschaften bei Spannungen von 6 bis 800 kV. Damit ist der Einsatz von SF₆ nicht nur in elektrischen Schaltanlagen von Windrädern sondern auch in Konverter-Stationen von Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragungs-Leitungen (HGÜ) zur Wandlung von Wechselstrom in Gleichstrom auf 525 kV (525.000 V) und zurück zu erwarten. Folglich würden bei Spannungen von symmetrisch 262,5 kV gegen Masse, spannungsführende Teile in Luft einen Abstand von mindestens 2,6 m benötigen. In gekapselten Schaltanlagen wird SF₆ unter einem Druck von ca. 5 -10 bar verwendet, was elektrischen Überschlägen vorbeugt. Welche anderen technische Gase, mit welchen Eigenschaften, in welchem Spannungsbereich, sich alternativ zu SF₆ und speziell bei Windrädern eignen, wäre eine Frage an die Hersteller technischer Gase, wie die Firmen Linde oder Solvay.

In großem Umfang wird SF₆ auch zur Herstellung von Magnesium eingesetzt, wo es den Kontakt der heißen Metallschmelze mit der Luft verhindert. SF₆ wird auch in der Halbleiter-Technik u. a. für Ätzprozesse (Deep Reactive-Ion Etching) und in geringen Mengen in der Medizin und anderen Spezialanwendungen eingesetzt.

SF₆ wird beim Einatmen zu einem erheblichen Gesundheitsrisiko. Da es schwerer ist als Luft, sammelt es sich in den unteren Lungenflügeln und führt wegen der behinderten Abatmung zur Übersättigung des Blutes mit Kohlendioxid, was unbemerkt zu Bewusstlosigkeit führt. SF₆ kann nur durch einen Kopfstand des Betroffenen vollständig aus der Lunge entfernt werden.

Quellen: <https://www.chemie.de/lexikon/Schwefelhexafluorid.html>
<https://de.wikipedia.org/wiki/Schwefelhexafluorid>

Die territorialen Schwerpunkte des Einsatzes von SF₆ liegen im asiatisch-pazifischen Raum, insbesondere in China und Indien.

SCHWEFELHEXAFLUORID-MARKT – WACHSTUM, TRENDS, UND PROGNOSEN (2023 – 2028)

<https://www.mordorintelligence.com/de/industry-reports/sulfur-hexafluoride-market>

2. Die Infrarot-Eigenschaften von SF₆

Die medial gebrauchten Bezeichnungen „Klimakiller“ und „Treibhausgas“ bedürfen einer physikalischen Erklärung, um die Wirkung von SF₆ einordnen zu können. Dies trifft auch auf die Angaben zur 23.000-fachen klimaschädlichen Wirkung von SF₆ gegenüber CO₂ und die Halbwertszeit von 3.000 Jahren für SF₆ zu.

Die Atmosphäre der Erde ist kein Treibhaus, da sie im Gegensatz zu einem solchen kein Dach besitzt, welches die am Boden erwärmte Luft zurückhält. Im Gegenteil ist die Atmosphäre für Infrarotabstrahlung (IR-Strahlung) teilweise strahlungsoffen (Atmosphärisches Fenster) und CO₂ sorgt nicht nur für die Absorption von IR-Strahlung in der Troposphäre, sondern auch für die IR-Abstrahlung in den Weltraum in der Stratosphäre, und damit für die Kühlung der Erde. In diesem Kontext ist auch die Wirkung von SF₆ zu betrachten.

Infrarotstrahlung (IR-Strahlung) kann Molekülschwingungen, d. h. periodische Lageveränderungen der Atome in einem Molekül zueinander (wie z.B. Streck- oder Biegeschwingungen) induzieren. Die Schwingungsformen werden z. B. hier demonstriert:

<https://de.wikipedia.org/wiki/Infrarotspektroskopie>

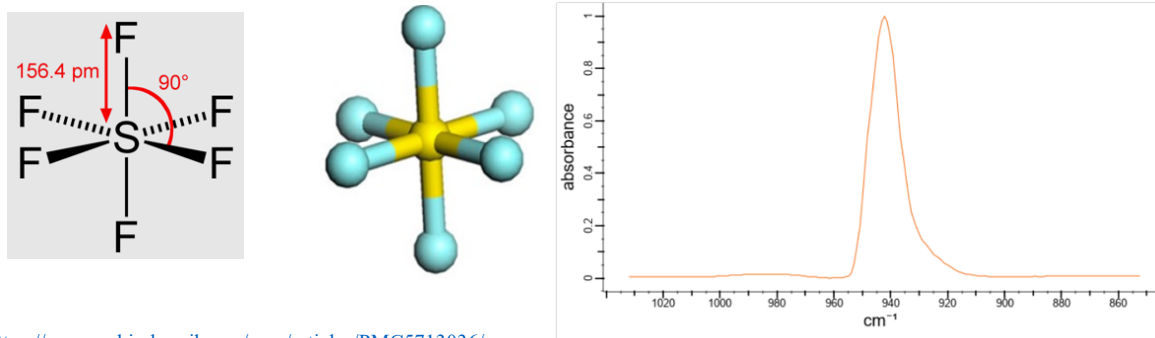
IR-aktiv können nur Moleküle mit einem permanenten Dipolmoment (wie H₂O) oder mit einem induzierten Dipolmoment (wie CO₂) sein. Wenn entweder permanent oder durch IR-Anregung induziert, der Schwerpunkt der elektrischen Ladungen (aus negativ geladenen Elektronen und positiv geladenen Atomkernen) nicht zusammenfällt, besitzt das Molekül ein elektrisches Dipolmoment. Dies ist die Voraussetzung für die Absorption und Emission von IR-Strahlung.

Die Strukturformel von SF₆ zeigt eine Octahedrale Geometrie mit jeweils 90-Grad Winkeln zwischen den Fluor-Atomen. SF₆ ist symmetrisch und hat kein permanentes Dipolmoment, ein solches wird erst durch IR-Strahlung induziert. Das IR-Absorptionsspektrum hat einen Peak bei einer Wellenzahl von 940 cm⁻¹ (entspr. einer Wellenlänge von 10,6 μm). Die Wellenzahl ist die in der IR-Spektroskopie übliche Maßeinheit und entspricht hier die Anzahl der Schwingungen pro Zentimeter (cm). Sie ist der Kehrwert der Frequenz (Hz), die Umrechnung von Wellenzahl ν (in cm⁻¹) in Wellenlänge λ in Mikrometer (μm) erfolgt nach der Größengleichung $\lambda = 10.000 * 1 / \nu$ (Erklärung zur Wellenzahl)

<https://studyflix.de/ingenieurwissenschaften/wellenzahl-1645>

Die Maßeinheit der Wellenlänge wird allgemein in der Physik benutzt, die Wellenzahl in der IR-Spektroskopie und analytischen Chemie. Da beide Maßeinheiten einander durch Umrechnung entsprechen und im Folgenden verschiedene Abbildungen, entweder in Wellenlänge bzw. Wellenzahl gezeigt werden, ist es notwendig, auf diesen Umstand hinzuweisen. Die Abb. 1 zeigt links die Strukturformel von SF₆ in 2D und in der Mitte in 3D. Rechts ist das IR-Absorptionsspektrum von SF₆ zu sehen, mit dem Maximum (Peak) bei 940 cm⁻¹ (10,6 μm).

Abb. 1. Strukturformel und IR-Absorptionsspektrum von SF₆



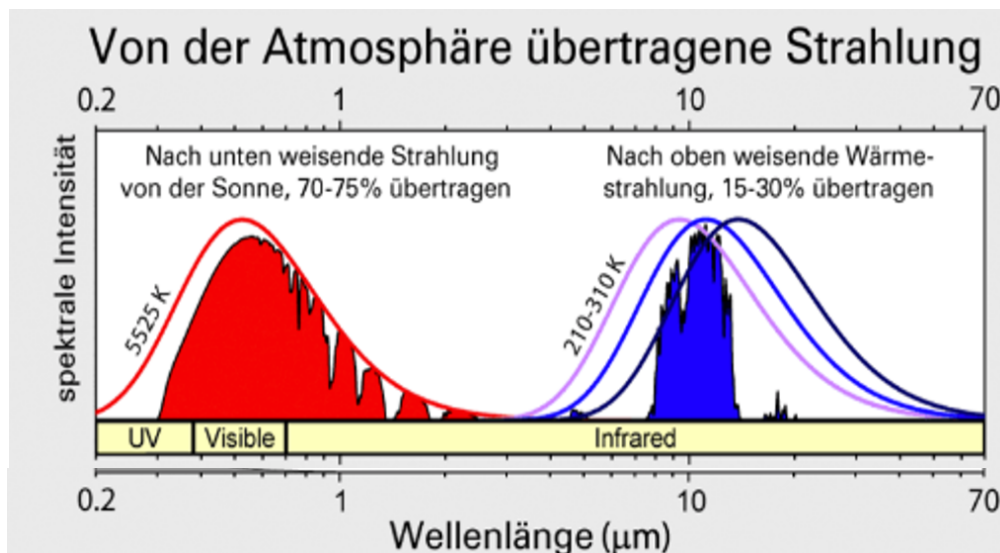
<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5713036/>

<https://spectrabase.com/spectrum/1cMM4g76vLy>

3. Die Erde ist kein Treibhaus - Betrachtungen zu Planck'schen Strahlern

Um die Klima-Wirkung von SF₆ zu verstehen, ist die IR-Abstrahlung der Erde in den Weltraum zu betrachten. Abb. 2 zeigt links (in rot) die Einstrahlung der Sonne auf die Erde, die sogenannte Planck'sche Strahlungskurve. Das Maximum der Abstrahlung der Sonne, deren Oberflächentemperatur ca. 5800 K beträgt, liegt bei einer Wellenlänge von 540 nm (540 Nanometer = 0,54 µm). Dies wird vom menschlichen Auge als die Farbe „grün“ wahrgenommen. Der vom Menschen wahrgenommene Spektralbereich des sichtbaren Lichts (VIS = Visible) reicht etwa von 380 nm (blau) bis 680 nm (rot). Die in Abb. 2 gezeigte Planck-Kurve der Abstrahlung des Sonnenlichtes umfasst den UV-, den VIS- und den nahen Infrarot-Bereich (NIR). Diese Sonnen-Strahlung gelangt durch die Atmosphäre zur Erde und erwärmt diese. Die erwärmte Erde strahlt nun nicht im UV/VIS Bereich ab, sondern im IR-Bereich. Die blaue Kurve in Abb. 2 zeigt diese IR-Abstrahlung im Wellenlängenbereich von ca. 5 µm – 50 µm. Es ist zu beachten, dass die Abszisse (X-Achse) eine logarithmische Skalierung hat. Dargestellt ist die Planck-Kurve, und zwar so, als ob die Erde keine Atmosphäre hätte.

Abb. 2. Planck'sche Strahlen-Kurven der UV/VIS/IR- Einstrahlung auf die Erde (links) und der IR-Abstrahlung der Erde (violett, blau, schwarz)



Ausschnitt aus: https://de.wikipedia.org/wiki/Treibhauseffekt#/media/File:Atmospheric_Transmission_de.png

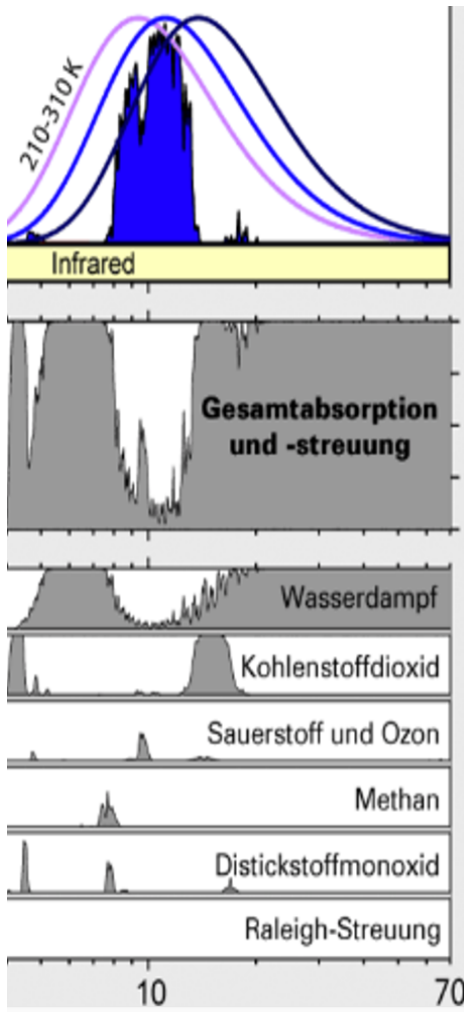
Im Folgenden sei die Abstrahlung Erde samt Atmosphäre betrachtet. Die Atmosphäre besteht zu 78,08 % aus Stickstoff (N₂), zu 20,95 % aus Sauerstoff (O₂) und zu 0,95 % aus Argon (Ar) sowie den Spurengasen Helium (He), Neon (Ne) und Krypton (Kr), deren Moleküle nicht zur IR-Absorption beitragen. Hinzu kommen die IR-aktiven Gase, Kohlendioxid (CO₂) mit 0,04 % (400 ppm), Methan (CH₄) mit 0,00018 % (1,8 ppm bzw. 1800 ppb), Distickstoffmonoxid (N₂O) mit 0,0000323 % (0,323 ppm bzw. 323 ppb) und Ozon (O₃) hauptsächlich in der Stratosphäre. Das Wichtigste, weil stärkste IR-aktive Gas (auch Treibhausgas genannt) ist Wasserdampf (H₂O) bis 4 % (40.000 ppm). (Anm: Angaben in Volumen-Prozent, respektive ppm oder ppb)

Anmerkung: Die Einheiten ppm und ppb werden in der Spurenanalytik verwandt und bezeichnen Anteile (parts) in Bezug auf eine Million (ppm – parts per million) bzw. per Milliarde (ppb – parts per billion). Dies sind relative Maßeinheiten, d. h. man muss definieren, ob sie sich auf die Masse, das Volumen, das Molekulargewicht oder die Anzahl der Teilchen beziehen. In diesem Zusammenhang beziehen sie sich auf Volumen-Prozent. Es ist

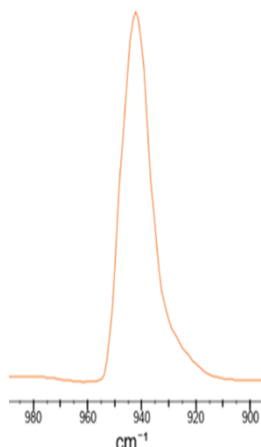
also nicht streng korrekt, sie auf die Anzahl der Teilchen (wie 400 auf 1 Mio.) zu beziehen, da sich die Gas-Moleküle der Atmosphäre in ihren Molekulgewichten und Volumen unterscheiden. Wenngleich man die Zählweise als „Anzahl der Moleküle“ bei qualitativen Betrachtungen als Näherung betrachten mag.

Um die folgenden Betrachtungen zu erleichtern, zeigt die Abb. 3. nur den relevanten Bereich der IR-Abstrahlung der Erde von ca. 5 – 50 μm der Abb. 2 sowie die IR-Absorptions-Spektren der IR-aktiven Gase (sogenannte Treibhausgase).

Abb. 3. IR-Abstrahlung der Erde mit Zuordnung der IR-Absorptionsbanden IR-aktiver Moleküle



Die drei Kurven zeigen die theoretische infrarote (IR) Strahlung der Erde (Planck-Kurven) bei Temperaturen von 210 - 310 Kelvin (Minus 63 bis 37 Celsius), wobei die blaue Kurve etwa 15 C° entspricht. Die blaue Fläche unter den Kurven ist das sogenannte „Atmosphärische IR-Fenster“, der Spektralbereich von ca. 8 – 13 μm in dem die IR-Abstrahlung der Erde die Atmosphäre ungehindert Richtung Weltraum verlässt, da hier die IR-aktiven Gase der Atmosphäre nur wenige IR-Absorptionsbanden haben. Nur weil es dieses „Fenster“ gibt, ist IR-Spektroskopie von Satelliten zur Erde überhaupt möglich. Zu sehen ist das „Fenster“ auch in der Abb. links (Gesamtabsorption und Streuung). Diese zeigt, dass außer im Bereich dieses „Fensters“, die IR-aktiven Gase in Summe stark absorbieren. Im Weiteren sind die Anteile an der IR-Absorption der IR-aktiven Gase dargestellt. Wasserdampf (H_2O) hat den bei weitem größten Anteil an der IR-Absorption und damit am „Treibhauseffekt“. Kohlendioxid (CO_2) trägt mit seiner Biegeschwingungsbande (15 μm) zur Absorption bei, während seine Streckschwingungsbande (4 μm) außerhalb der Planck-Kurve (blau) liegt und damit nicht zur IR-Absorption beiträgt. Auch die IR-Absorption von Methan (CH_4) und Distickstoffmonoxid (N_2O) ist mit der IR-Absorption von Wasserdampf (H_2O) überlagert.



In der Abb. links (gelbe Kurve) ist die IR-Absorptionsbande von Schwefelhexafluorid (SF_6) bei 10,6 μm (der obigen Darstellung angepasst) zu sehen. Dieses IR-Spektrum ist hier (zur besseren Sichtbarkeit) nicht maßstäblich dargestellt. Man vergleiche es in der Breite ggf. mit dem o. g. Spektrum von CO_2 .

Der Einfluss von SF_6 ist in der Realität größer, als es die bloße Feststellung einer „23.000-fach“ größeren „Klimaschädlichkeit“ (Extinktionskoeffizient) verglichen mit CO_2 , vermuten lässt. Denn was bedeutet die Zahl „23.000-fach“?

Dazu gilt es, die Physik der IR-Absorption zu betrachten.

4. Die Absorption elektromagnetischer Strahlung

Die Durchlässigkeit (Transmission) für elektromagnetische Strahlung (wie Röntgenstrahlung, UV, VIS, IR) durch ein Medium (Absorber) folgt einer natürlichen Exponential-Funktion mit negativem Exponenten. In der Spektroskopie ist dafür die Schreibweise üblich, bei der „ I_0 “ die Intensität beim Eintritt der Strahlung in den Absorber ist und „ I “ die nach dem Absorber gemessene Intensität. Im Exponenten dieser Exponential-Funktion steht das Produkt aus dem Extinktionskoeffizienten (ϵ') bei der Wellenlänge (λ), der Konzentration des Absorbers (c) und der Länge des „Lichtweges (d) im absorbierenden Material“. Daraus ergibt sich für die Transmission (T) eine Exponentialfunktion zur Basis „ e “ ($e = \text{Euler'sche-Zahl} = 2,71828\dots$).

$$T = I/I_0 = e^{-\epsilon' c d} \quad (\text{Gl. 1})$$

In der IR-Spektroskopie wird dies auch als „Lambert-Beer-Gesetz“ bezeichnet. Durch Logarithmieren der E-Funktion wird die Extinktion (E), als die „Absorbanz des Materials für Licht der Wellenlänge λ “ abgeleitet.

$$E = \ln \left(\frac{I_0}{I} \right) = -\ln \left(\frac{I}{I_0} \right) = \epsilon' c d \quad (\text{Gl. 2a})$$

Die Extinktion und der Extinktionskoeffizient werden allerdings nicht über den natürlichen Logarithmus definiert. Dieser wird einfach in die Konstante gezogen, aus ϵ' wird ϵ . Dabei ist ϵ der natürliche molare Extinktionskoeffizient.

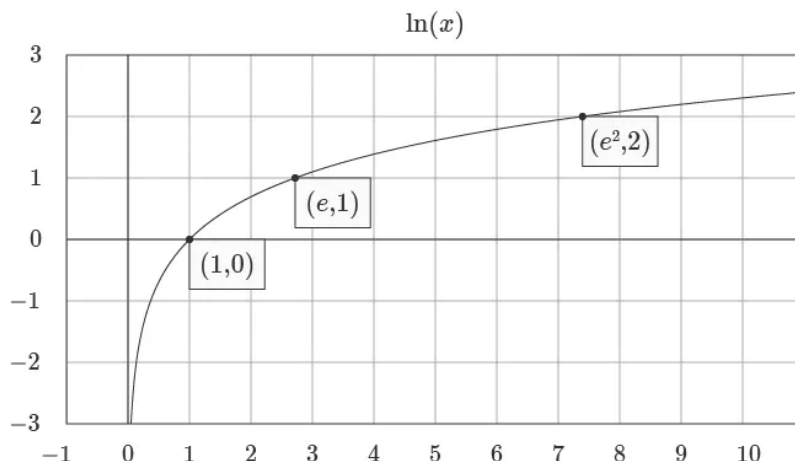
$$E = \lg \left(\frac{I_0}{I} \right) = -\lg \left(\frac{I}{I_0} \right) = \epsilon c d \quad (\text{Gl. 2b})$$

Dies zeigt die Extinktion (E) als dekadischen Logarithmus, gebildet aus Intensität (I_0) am Eingang des Absorbers zur Intensität (I) am Ausgang des Absorbers bzw. als lineare Funktion des Produktes von Extinktionskoeffizient, Konzentration und Dicke des Absorbers ($\epsilon c d$). Die Darstellung ist „Chemie.de“ entnommen. https://www.chemie.de/lexikon/Lambert-Beersches_Gesetz.html

Dies o. g. Zusammenhänge sind Grundlage der Infrarot-Spektroskopie (IR-Spektroskopie), die weltweit eine breite Anwendung durch Zehntausende IR-Spektrometern findet. In der Atmosphäre der Erde finden die gleichen physikalischen Prozesse statt, die Grundlage der IR-Spektroskopie sind, wenn auch komplexer. Die u. g. Betrachtungen mögen dies beleuchten.

Die typische Konsequenz einer Logarithmus-Funktion, hier für die Extinktion (Absorption) ist deren „Sättigung“ bzgl. der Werte auf der Ordinate (Y-Achse) mit fortschreitenden Werten auf der Abszisse (X-Achse). Die Funktion konvergiert asymptotisch gegen einen Grenzwert, geht also in eine „Sättigung“. Quelle: <https://de.wiki-base.com/7773186-excel-ln-function>

Abb. 4. Typischer Kurvenverlauf einer logarithmischen Funktion



In der Praxis bedeutet dies, dass mit zunehmender Konzentration eines beliebigen IR-aktiven Gases (sogenanntes Treibhausgas) die Absorption (gleich Wechselwirkung mit dem Absorber, respektive Eintrag von Energie) immer geringer wird. Immer mehr Eintrag von CO₂ in die Atmosphäre bewirkt immer weniger. Gleichzeitig zeigt Abb. 4, dass bereits geringe Konzentrationen z.B. von SF₆ einen signifikanten Eintrag von Energie mit hohem Anstieg (Gradienten) verursachen. Entgegen landläufigen Vorstellungen, hat also der weitere Eintrag eines „Treibhausgas“ dessen Absorption bereits in der Sättigung ist (wie CO₂) einen geringeren Anstieg (Gradient) des Energieeintrages zur Folge, als bei einem „Treibhausgas“, dass noch weit von der Sättigung entfernt ist, wie SF₆. Deshalb ist es wichtig, nicht nur die Extinktionskoeffizienten (ϵ) verschiedener „Treibhausgase“ zu vergleichen (wie von CO₂ und SF₆), sondern auch den bereits erreichten Grad der Sättigung der Absorption der IR-Strahlung.

Die Absorption der IR-Strahlung von CO₂ auf der relevanten Absorptionsbande von 15 μm ist in der Sättigung, während die Absorption der IR-Strahlung bei der geringen Konzentration von SF₆ bei 10,6 μm sehr weit von der Sättigung entfernt ist und damit viel stärker im Anstieg (Gradient) wirkt, als die bloße Zahl der 23.000-fachen „Klimawirkung“ (respektive Extinktionskoeffizient) gegenüber CO₂ vermuten lässt.

Die Sättigung der IR-Absorption von CO₂ wurde bereits vor über 30 Jahren bestätigt. Doch diese altbekannte Tatsache scheint auf wundersame Weise aus der medial veröffentlichten Debatte verschwunden zu sein? Zusammengefasst heißt sie: CO₂ „heizt“ nicht nur die Luft in der Troposphäre, sondern „kühlt“ die Erde auch durch IR-Abstrahlung in der Stratosphäre. Eine Zunahme von CO₂ kann wenig bewirken, da die IR-Absorption in der Sättigung ist.

Dritter Bericht der Enquete Kommission des Bundestages (von 1990)

<https://dserver.bundestag.de/btd/11/080/1108030.pdf>

Auf S. 131 zu Abb. 19 steht (Zitat):

„Auffallend in Abbildung 19 ist auch die fast vollständige Absorption durch Kohlendioxid bei 15 μm . Demnach führt eine Erhöhung der CO₂-Konzentration nur zu einer vergleichsweise geringen Veränderung des Treibhauseffekts durch zusätzliche Absorption der 15 μm -Bande. Die Zunahme des Treibhauseffekts erfolgt in einer solchen fast gesättigten Bande in guter Näherung logarithmisch, das heißt, jede Verdoppelung der CO₂-Konzentration bewirkt die gleiche Erhöhung der Temperatur (Anm: damalige Annahme etwa 2,5°C). Im Gegensatz zur Erwärmung der Troposphäre führt die Zunahme des atmosphärischen CO₂-Gehaltes zu einer Abkühlung in der Stratosphäre. Dort ist das Kohlendioxid für einen großen Teil der infraroten Ausstrahlung in den Weltraum verantwortlich, da die Stratosphäre etwa einhundertmal mehr CO₂ als Wasserdampf enthält. Die niedrige Wasserdampfkonzentration in der Stratosphäre ist auf die niedrigen Temperaturen im Bereich der Tropopause zurückzuführen (vgl. Nr. 1.4.1). Dagegen wird die CO₂-Konzentration nicht von ähnlichen Vorgängen beeinflusst. Da in der Stratosphäre die Temperatur mit der Höhe wieder zunimmt, emittiert das Kohlendioxid mit der Höhe zunehmend wirksam infrarote Strahlung in den Weltraum. Dadurch wird die gleichzeitig ablaufende Erwärmung der Stratosphäre durch die Ozonabsorption im kurzwelligen Spektrum der Sonnenstrahlung zum Teil wieder kompensiert. Nimmt die CO₂-Konzentration zeitlich zu, wird die Ausstrahlung aus der Stratosphäre verstärkt und führt dadurch zu einer Abkühlung, die sich im Bereich der oberen Stratosphäre besonders stark bemerkbar macht.“ (Ende Zitat)

5. Begriff der „Klimasensitivität“ erklärt am Beispiel von Kohlendioxid CO₂

Der Begriff „Sensitivität“ (sensitivity) einer Funktion $f(x)$ ist in der Physik die Steigung (Gradient) der Tangente am Punkt x der Funktion $f(x)$. Diese wird mathematisch durch die erste Ableitung d. h. als Differential $f'(x) = df(x)/dx$ berechnet. Diese Erklärung dient hier nur dazu, um aufzuzeigen, dass der physikalische Begriff „Sensitivität“ bei der „Klimasensitivität“ gar nicht zur Anwendung kommt, sondern, dass dieser eine eigene Definition hat. Diese wird auch „ECS“ (Equilibrium Climate Sensitivity) genannt und bezeichnet den Anstieg der Temperatur bei Verdoppelung der Konzentration z. B. von CO₂ in der Atmosphäre.

Die Schwächung (Extinktion), also die Wechselwirkung der Infrarot-Strahlung (IR), erfolgt gemäß einer logarithmischen Funktion (s. Gleichung 2a, b). Das heißt, jede Verdoppelung der CO₂-Konzentration bewirkt die gleiche Erhöhung der Temperatur. Dies hat zur Konsequenz, dass eine weitere Zunahme von CO₂ einen immer geringeren Einfluss auf die Temperatur ausübt. Dies ist die Folge, dass die Extinktion (Absorption) gemäß der Logarithmus-Funktion, mit zunehmender Konzentration zu deren asymptotischer Sättigung führt. Man kann sich dies als Experiment vorstellen. Man tropfe mittels einer Pipette Tinte in ein mit Wasser gefülltes Glas. Die Schwärzung des Wassers wird sichtbar zunehmen, jedoch ist irgendwann kaum noch eine weitere Zunahme erkennbar. Die Absorption von Licht im Wasser ist dann gesättigt und man erkennt auch bei weiterer Erhöhung der Anzahl der Tropfen keine Veränderung mehr. Die Logarithmus-Funktion in Abb. 4 und 5 beschreiben genau dies.

Abb. 5: Temperatur-Einfluss bei Zunahme der Konzentration IR-aktiver Gase am Beispiel von CO₂

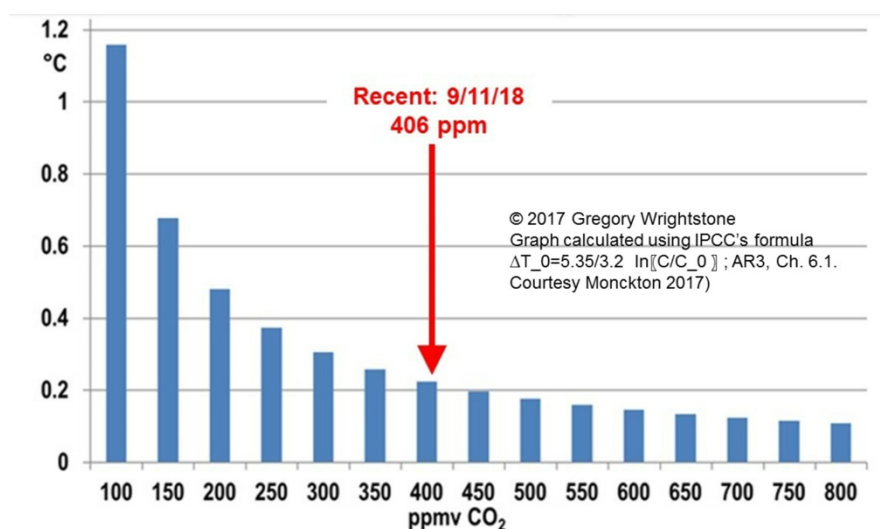
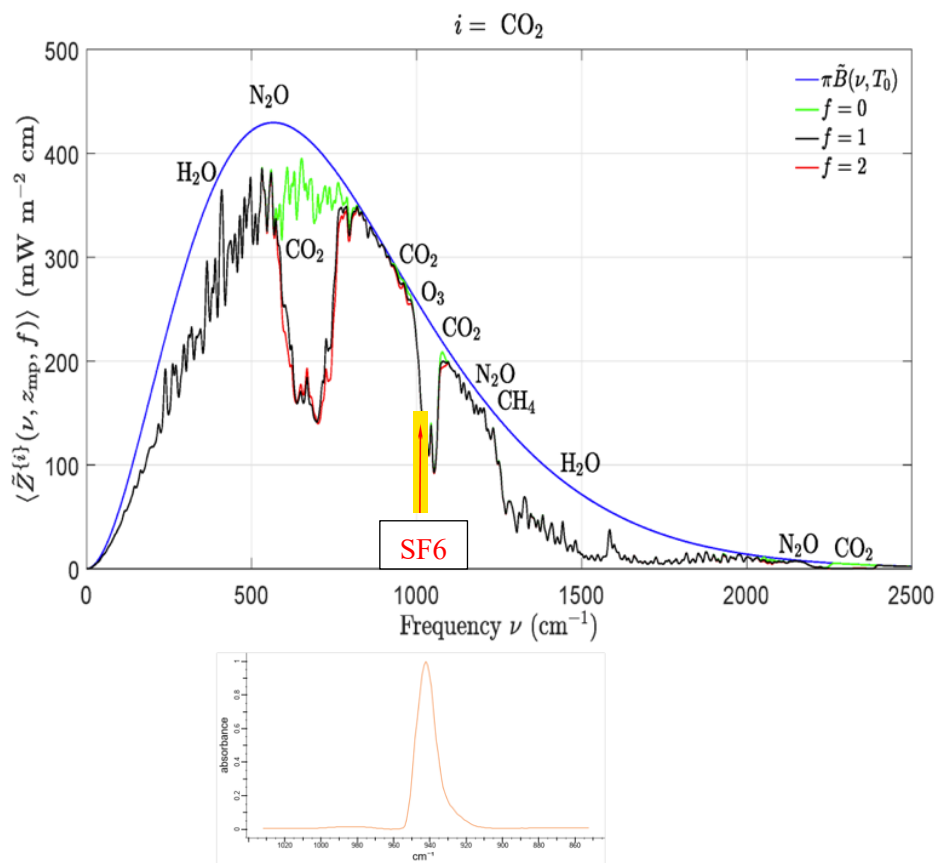


Abb. 5 zeigt den abnehmenden Einfluss auf die Temperatur bei zunehmender Konzentration von CO₂ in der Atmosphäre, berechnet gem. der vom IPCC (lt. Assessment Report 3) verwendeten Logarithmus-Funktion. Dies zeigt prinzipiell, wie beginnend mit einer (hypothetisch) CO₂-freien Atmosphäre, immer mehr CO₂ immer weniger Einfluss auf die Änderung der Temperatur (ΔT) hat. Bei Wasserdampf (H₂O) wäre zu beachten, dass dessen Konzentration (im Gegensatz zu CO₂) sehr stark (0 – 4 %) regional und je nach Wetterlage schwanken können. Da der Einfluss von SF₆, wie der aller IR-aktiven Gase (Treibhausgase) prinzipiell der gleichen Logarithmus-Funktion (mit abweichender Skalierung der Ordinate) folgt, wird klar, dass SF₆ bereits bei kleiner Konzentration eine große Wirkung hat. Diese erklärt sich aber nicht allein aus seinem um den Faktor 23.000-fach größeren Extinktionskoeffizient gegenüber CO₂, sondern auch aus der Tatsache, dass die IR-Absorption von SF₆ weit entfernt ist von einer Sättigung, ganz im Gegensatz zur Wirkung von CO₂.

6. Infrarot-Absorption IR-aktiver Gase (Treibhausgase) in der Atmosphäre

Abb. 6 zeigt die Planck'sche Strahlungs-Kurve (in blau) eines Schwarzer Strahlers, welche die IR-Abstrahlung der Erde ohne Atmosphäre darstellt. Die „gezackte Kurve“ ist die mittels Satelliten gemessenen IR-Strahlung der Erde in den Weltraum. Dargestellt ist hier die Transmission (Durchlässigkeit) der Atmosphäre für IR-Strahlung. Die Abszisse (X-Achse) ist in der Einheit cm^{-1} der Wellenzahl der IR-Strahlung und die Ordinate (Y-Achse) in der Einheit mW/m^2 als Leistungsdichte der IR-Strahlung bemaßt. Nur im Bereich von $770 - 1220 \text{ cm}^{-1}$ (entspr. $8 - 13 \mu\text{m}$) schmiegt sich die gemessene Kurve (schwarz) der berechneten (blauen) Kurve an. Dies ist der Bereich des „Atmosphärischen Fensters“ in dem (fast) keine Absorption von IR-Strahlung in der Atmosphäre stattfindet und die IR-Strahlung der Erde ungehindert in den Weltraum abgestrahlt wird. In den anderen Bereichen findet eine IR-Absorption durch die IR-aktiven Gase statt. Diese sind in ihrer Wirksamkeit über den Kurven vermerkt (H_2O , N_2O , CO_2 , CH_4). Der Anteil ihrer IR-Absorption ist als Differenz der Flächen zwischen der blauen Kurve und der schwarzen Linie abschätzbar. Man sieht auch hier, dass Wasserdampf (H_2O) die IR-Absorption über einen weiten Bereich dominiert. Die IR-Absorption von CO_2 ist durch den sogenannten „Absorptions-Trichter“, sichtbar als tiefe Tal bei 667 cm^{-1} (entspr. $15 \mu\text{m}$) sichtbar. Hier zeigt sich, dass CO_2 einen signifikanten Einfluss hat. Doch dies ist gar nicht die Frage, wenn es um CO_2 als vorgeblichen „Klima-Killer“ geht. Denn die gesamte IR-Absorption aller IR-aktiven Gase sorgt (nach der gängigen These) dafür, dass die Erde ca. $33 \text{ }^\circ\text{C}$ wärmer ist, als sie ohne IR-aktiver Gase wäre. Mit anderen Worten, wäre die Erde (nach der gängigen These) ohne „Treibhausgase“ viel zu kalt und damit für den Menschen unbewohnbar. (Es soll nicht unerwähnt bleiben, dass es auch andere Thesen gibt, da der Dissens in der Physik normal ist, s. Anmerkung * bei Literatur) Doch weiter zu Abb. 6 aus: <https://arxiv.org/pdf/2006.03098.pdf>

Abb. 6: Planck'sche Strahlungskurve der IR-Abstrahlung der Erde und Einfluss der IR-aktiven Gase



Die grüne Kurve zeigt die berechnete IR-Absorption, wenn kein CO₂ in der Atmosphäre wäre ($f=0$). Die schwarze Kurve in diesem Bereich zeigt den aktuell gemessenen Zustand bei 400 ppm (0,04 %) CO₂ in der Atmosphäre ($f=1$) und die rote Kurve zeigt die berechnete IR-Absorption bei Verdoppelung von CO₂ ($f=2$) von 400 ppm auf 800 ppm (0,08 %). Es ist zu erkennen, dass fast kein Unterschied zwischen der schwarzen Kurve (aktuell 400 ppm CO₂) und der roten Kurve in Bezug auf die Verdoppelung von CO₂ (auf 800 ppm) besteht. Wobei eine Verdoppelung von CO₂ (lt. IPCC) praktisch aufgrund der (sogenannten fossilen) Vorräte gar nicht möglich wäre.

Die IR-Absorptionsbande von Schwefelhexafluorid (SF₆) liegt in Abb. 6 (roter Pfeil auf gelbem Grund) bei der Wellenzahl von 940 cm⁻¹ (10,6 μm). Die IR-Absorptionsbande von SF₆ (gelb) wird zur Verdeutlichung unterhalb der Planck-Kurve angezeigt. Somit würde die IR-Absorption von SF₆ das „Atmosphärische Fenster“ verengen, und damit zur Verminderung der ungehinderten IR-Abstrahlung in den Weltraum führen. Wie hoch der quantitative Beitrag ist, hängt von der Konzentration von SF₆ in der Atmosphäre ab. Dazu können hier keine Angaben gemacht werden.

Quellenangaben:

Die Berechnung der Klimasensitivität für CO₂ sowie die Grafik lt. Abb. 6 kann der Publikation von W. A. van Wijngaarden und W. Happer entnommen werden. (in Englisch)

„**Dependence of Earth’s Thermal Radiation on Five Most Abundant Greenhouse Gases**“

<https://arxiv.org/pdf/2006.03098.pdf>

Erklärungen zur Grafik in Abb. 6 finden sich im Vortrag von Dr. Happer (bei ca. 24:00)

Thinking About Climate Change: William Happer, PhD (in Englisch)

<https://www.youtube.com/watch?v=4n-gfeoj-W0>

Literatur

Das Plank’sche Strahlungsgesetz

https://www.didaktik.physik.uni-muenchen.de/materialien/grundlagen/planck/m4_2_planck.pdf

Erklär-Video zum Plank’sche Strahlungsgesetz

<https://www.youtube.com/watch?v=maclb4qBZqI>

Anmerkung (*): Es gehört zur wissenschaftlichen Exaktheit, zu erwähnen, dass es in der Physik auch Veröffentlichungen gibt, die den Treibhauseffekt negieren. Dies geschieht z. B. aufgrund der These, dass es bei Berücksichtigung anderer Randbedingungen und anderer Integralbildung, von mittleren anstatt gemittelten Temperaturen, bei der Berechnung gem. Stefan-Boltzmann-Gesetz, es physikalisch-theoretisch keiner Erklärung durch einen Treibhauseffekt bedürfe. Da es eine Erde ohne Atmosphäre (wie dies nach dem Stefan-Boltzmann-Gesetz berechnet wird) nicht gibt, ist dies grundsätzlich (dempirisch) nicht beweisbar. Deshalb steht im Titel der u. g. Veröffentlichung der Begriff „Falsifizierung“, was ein logisch-theoretischer Ansatz ist (s. Karl Popper zur Falsifizierung). Da Dissens stets „das Salz in der Suppe“ der Physik ist, möge die Veröffentlichung der Theoretischer Physiker Gerhard Gerlich und Ralf D. Tscheuschner jedoch nicht unerwähnt bleiben.

„**Falsification Of The Atmospheric CO₂ Greenhouse Effects Within The Frame Of Physics**“

Kostenpflichtig: <https://www.worldscientific.com/doi/abs/10.1142/S021797920904984X>

kostenfrei: <https://archive.org/details/arxiv-0707.1161/page/n7/mode/2up>