

THE
LONDON, EDINBURGH, AND DUBLIN
PHILOSOPHICAL MAGAZINE
AND
JOURNAL OF SCIENCE.

[FIFTH SERIES.]

APRIL 1896.

XXXI. *On the Influence of Carbonic Acid in the Air upon the Temperature of the Ground.* By Prof. SVANTE ARRHENIUS*.

I. Introduction: Observations of Langley on Atmospheric Absorption.

A GREAT deal has been written on the influence of the absorption of the atmosphere upon the climate. Tyndall † in particular has pointed out the enormous importance of this question. To him it was chiefly the diurnal and annual variations of the temperature that were lessened by this circumstance. Another side of the question, that has long attracted the attention of physicists, is this: Is the mean temperature of the ground in any way influenced by the presence of heat-absorbing gases in the atmosphere? Fourier ‡ maintained that the atmosphere acts like the glass of a hot-house, because it lets through the light rays of the sun but retains the dark rays from the ground. This idea was elaborated by Pouillet §; and Langley was by some of his researches led to the view, that "the temperature of the earth under direct sunshine, even though our atmosphere were present as now, would probably fall to -200° C., if that atmosphere did not possess the quality of selective

* Extract from a paper presented to the Royal Swedish Academy of Sciences, 11th December, 1895. Communicated by the Author.

† 'Heat a Mode of Motion,' 2nd ed. p. 405 (London, 1885).

‡ *Mém. de l'Ac. R. d. Sci. de l'Inst. de France*, t. vii. 1827.

§ *Comptes rendus*, t. vii. p. 41 (1838).

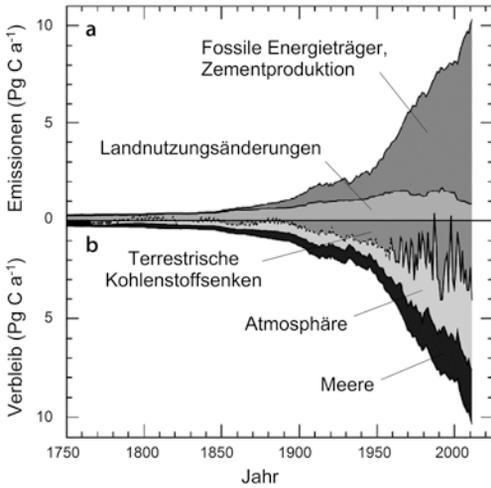
Phil. Mag. S. 5. Vol. 41. No. 251. April 1896. S

■ Abb. 1.2 Titelseite der Originalveröffentlichung von Arrhenius (1896), in der er erstmals auf den anthropogenen Beitrag zum Treibhauseffekt durch die Freisetzung von CO_2 bei der Verbrennung fossiler Energieträger hinweist

terrestrischer Infrarotstrahlung und damit zu einer Erwärmung der Erdatmosphäre führt (Arrhenius 1896; vgl. ■ Abb. 1.2). Arrhenius machte also seine Entdeckung zu einem Zeitpunkt, als die industrielle Revolution gerade globale Ausmaße angenommen und soeben West- und Mitteleuropa, die USA und Japan erfasst hatte. Es ist also nicht so, dass man nicht schon relativ früh im Industriezeitalter von den Auswirkungen der CO_2 -Emissionen auf die Temperatur der Erdatmosphäre gewusst hätte. Allerdings zogen Arrhenius

und nach ihm andere die falschen Schlüsse, was die Konsequenzen der anthropogenen Klimaerwärmung für Mensch und Umwelt anbelangte. Er sah in der Klimaerwärmung keine Gefahren, sondern begrüßte die Aussicht auf ein, wie er dachte, gleichmäßigeres und besseres Klima und höhere Ernten (Arrhenius 1906). Seinem Zeitgenossen Walther Nernst, wie Arrhenius Physiker, Chemiker und späterer Nobelpreisträger für Chemie, wird der Vorschlag zugeschrieben, wirtschaftlich unrentable Kohlefelder in Brand zu setzen, um gezielt CO_2 zur Erwärmung des Klimas freizusetzen (nach einem Interview von Thomas Kuhn mit James Franck, *Archive for History and Quantum Mechanics*, zitiert nach Weart 2013).

Die globalen CO_2 -Emissionen (■ Abb. 1.3a) aus der Verbrennung fossiler Energieträger und aus der Zementherstellung, welche eine weitere quantitativ bedeutsame Quelle für CO_2 darstellt, sind seit dem Beginn der Industrialisierung exponentiell angestiegen (Keeling 1973; Andres et al. 1999). Während Andres et al. (1999) für 1750 von einem Niveau von $0,003 \text{ Pg C a}^{-1}$ ($= 3 \text{ Mio. t}$) ausgehen, werden die anthropogenen CO_2 -Emissionen infolge der Verbrennung fossiler Energieträger für 2017 auf $9,9 \text{ Pg C a}^{-1}$ geschätzt; das Mittel für den Zeitraum von 2008 bis 2017 beträgt $9,4 \text{ Pg C a}^{-1}$ (Le Quéré et al. 2018). In der Summe wurden zwischen 1750 und 2011 insgesamt 375 Pg C durch die Verbrennung fossiler Energieträger und die Zementproduktion freigesetzt (IPCC 2013). Der so aus Kohle, Erdöl und Erdgas innerhalb von 261 Jahren freigesetzte Kohlenstoff stammt aus Lagerstätten, die über Zeiträume von vielen Millionen Jahren gebildet wurden (Berner 2003). Zusätzliches CO_2 wurde durch Landnutzungsänderungen freigesetzt, namhaft durch die Rodung von Wäldern. Für den Zeitraum von 1750 bis 2011 wird die Menge des so emittierten CO_2 auf etwa 180 Pg C geschätzt. Zusammen entspricht dies einer anthropogenen Freisetzung von CO_2 in Höhe von 555 Pg C (IPCC 2013). Lejeune et al. (2018) nehmen an, dass über Veränderungen in der



■ **Abb. 1.3** (a) Jährliche anthropogene CO_2 -Emissionen durch den Verbrauch fossiler Energieträger, die Zementproduktion und Landnutzungsänderungen sowie (b) deren Verbleib in terrestrischen Kohlenstoffsenken (z. B. Wälder), Meeren und der Atmosphäre im Zeitraum von 1750 bis 2011. (Nach IPCC 2013, S. 487)

Kohlenstoffbilanz die Entwaldungen in den mittleren Breiten Eurasiens und Nordamerikas allein vom Beginn der Industrialisierung bis 1920 mit 0,3 K zur Erwärmung beigetragen haben.

Die mittlere CO_2 -Konzentration der Atmosphäre lag 2012 bei 393 ppm, was 140 % der Konzentration vor der Industrialisierung (278 ppm vor 1750) entspricht (WMO 2013); bis 2018 war sie bereits auf 409 ppm (= 147 % der vorindustriellen Konzentration) angewachsen (NOAA 2019). Die politischen Bemühungen um die Verringerung der weltweiten CO_2 -Emissionen haben bislang nicht zu einer Abnahme der anthropogenen CO_2 -Emissionen auf globaler Ebene, wohl aber zu deren Abnahme in einzelnen Regionen geführt (Le Quéré et al. 2019). Der Anstieg der CO_2 -Konzentration in der Atmosphäre beschleunigt sich zusehends; er betrug im zehnjährigen Mittel $1,5 \text{ ppm a}^{-1}$ in den 1990er-Jahren, $1,9 \text{ ppm a}^{-1}$ im Zeitraum von 2000 bis 2009 und $2,3 \text{ ppm a}^{-1}$ für das Intervall von 2010 bis 2018 (Le Quéré et al. 2018). Von allen durch den Menschen freigesetzten

Treibhausgasen hat CO_2 den größten Einfluss auf die Strahlungsbilanz der Erdatmosphäre. Etwa zwei Drittel des Strahlungsantriebs durch Treibhausgase seit 1750 gehen auf CO_2 zurück (WMO 2013).

Die Veränderung in der CO_2 -Konzentration der Atmosphäre in den letzten 70 Jahren verlief 100-mal schneller als nach der letzten Eiszeit, als durch die Temperaturabhängigkeit der CO_2 -Löslichkeit in den Ozeanen mit der Erwärmung die atmosphärische CO_2 -Konzentration auf 260 bis 280 ppm anstieg (WMO 2017). Der Konzentrationsanstieg der letzten 150 Jahre war schneller als jemals zuvor auf der Erde. Die derzeitige CO_2 -Konzentration von über 400 ppm entspricht der des mittleren Pliozäns vor 3 bis 5 Mio. Jahren. Zu jener Zeit stand die CO_2 -Konzentration von 400 ppm mit einer globalen Mitteltemperatur im Gleichgewicht, die um 2 bis 3 K über der heutigen lag. Die Eisschilde Grönlands und der Westantarktis schmolzen in dieser Zeit vollständig, jener der Ostantarktis teilweise, und der Meeresspiegel lag um 10 bis 20 m höher als heute (Naish et al. 2009; Pollard und DeConto 2009; Hill et al. 2010). Andere wichtige Treibhausgase, die als Folge menschlicher Aktivitäten in die Atmosphäre freigesetzt werden, sind CH_4 , N_2O , Halogenkohlenwasserstoffe und Schwefelhexafluorid. **Methan (CH_4)** wird natürlicherweise von **methanogenen Archaeobakterien** in vernässten Böden, also vor allem in Mooren und Sümpfen, in den Sedimenten von Gewässern und im Verdauungstrakt von Tieren gebildet (Zimmerman et al. 1982; Matthews und Fung 1987; Whiting und Chanton 1993). Die präindustrielle CH_4 -Konzentration in der Atmosphäre wird auf 700 ppb geschätzt (WMO 2013). Im Jahr 2017 war die CH_4 -Konzentration in der Atmosphäre mit 1857 ppb mehr als 2,6-mal so hoch (NOAA 2019). Etwa 60 % der CH_4 -Emissionen sind anthropogener Herkunft. Wichtige Quellen sind der Nassfeldreisanbau (Aselman und Crutzen 1989; Neue 1993), die Tierhaltung (Monteny et al. 2006; Lassey 2007), die Kohle-, Erdöl- und Erdgasförderung (Kort et al. 2014) und Müllkippen.

Vor allem verbesserte Kulturtechniken beim Reisanbau haben eine Reduktion der CH_4 -Emissionen aus dieser Quelle trotz gesteigerter Produktion seit den 1980er-Jahren bewirkt (Kai et al. 2011), was insgesamt zu einer zumindest vorübergehenden Verlangsamung der globalen CH_4 -Emissionen geführt hat (Estrada et al. 2013). Dennoch ist CH_4 nach CO_2 das zweitbedeutsamste Treibhausgas; 18 % des Strahlungsantriebs durch Treibhausgase seit 1750 werden ihm zugeschrieben (WMO 2013).

Die atmosphärische Konzentration von **Lachgas (N_2O)** ist von 270 ppb vor 1750 (WMO 2013) auf 331 ppb im Jahr 2018 angestiegen (NOAA 2019). N_2O ist ein Zwischenprodukt der **Denitrifikation**, bei der Nitrat unter anaeroben Verhältnissen zu N_2 reduziert wird, kann aber auch unter aeroben Bedingungen als Nebenprodukt bei der **Nitrifikation** von NH_4^+ zu NO_3^- gebildet werden (Parton et al. 1996; Bateman und Baggs 2005). Der Anstieg der globalen N_2O -Emissionen ist vor allem dem Einsatz von Mineraldünger (Robertson et al. 2000) und der Viehhaltung (de Klein und van Logtestijn 1994; Mosier et al. 1998) sowie außerdem der Verbrennung fossiler Energieträger (Hayhurst und Lawrence 1992) und Vegetationsbränden (Poth et al. 1995) geschuldet.

Hauptsächlich anthropogenen Ursprungs sind die **Halogenkohlenwasserstoffe**, einschließlich der **Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW)**, und **Schwefelhexafluorid (SF_6)**. Diese Gase werden in erster Linie für technische Anwendungen produziert und haben oft hohe Verweildauern und Treibhauspotenziale (Fisher et al. 1990; Lashof und Ahuja 1990). Die Verweildauer von SF_6 beträgt 3200 Jahre und die von Tetrafluormethan (CF_4) sogar 50.000 Jahre (Jain et al. 2000). Die Reduktion der Emission von FCKW und anderen Halogenkohlenwasserstoffen durch das **Montrealer Protokoll** von 1987 zum Schutz der stratosphärischen Ozonschicht hat bei vielen Substanzen deutliche Rückgänge in der Konzentration in der Atmosphäre verursacht und dadurch auch zu einem verringerten Einfluss

auf die Strahlungsbilanz geführt (WMO 2013). Die atmosphärische SF_6 -Konzentration ist seit ersten Messungen im Jahr 1970 von 0,03 ppt über 2,8 ppt im Jahr 1992 (Maiss und Levine 1994) auf 9,8 ppt im Jahr 2018 angestiegen (NOAA 2019).

Die Nutzung **fossiler Energieträger** trägt nicht nur durch den Ausstoß von CO_2 und anderen Treibhausgasen zur Klimaerwärmung bei, sondern auch in Form von **Rußpartikeln**, die bei unvollständiger Verbrennung entstehen und als Aerosole (*Black Carbon Aerosols*) in die Atmosphäre emittiert werden. Rußpartikel sind Bestandteil des **Feinstaubes** mit einem Durchmesser bis 2,5 μm (*Particulate Matter, $\text{PM}_{2.5}$*). Sie erwärmen die Atmosphäre, indem sie im Gegensatz zu den Treibhausgasen zusätzlich zur terrestrischen Infrarotstrahlung auch kurzwelligere Solarstrahlung absorbieren (Smith et al. 2015). Außerdem sorgen Rußpartikel für die Verringerung der Albedo von Schnee und Eis, wenn sie dort auf der Oberfläche abgelagert werden, sowie für eine Albedoreduktion von Aerosolen, die nur teilweise aus Kohlenstoff bestehen (Bergstrom et al. 2002; Andreae und Gelencsér 2006; Ramanathan und Carmichael 2008). Der Beitrag von durch die Nutzung fossiler Energieträger freigesetzten Rußpartikeln zur Klimaerwärmung ist beträchtlich. Er liegt in einer ähnlichen Größenordnung wie der von CH_4 (Jacobson 2001; IPCC 2013). Die Wirkung von Rußpartikeln auf das Klima ist anders als bei den langlebigen Treibhausgasen regional stark unterschiedlich, da die Verweildauer in der Atmosphäre nur bei 6,4 Tagen liegt (Chung und Seinfeld 2002) und sich die Partikel daher nicht gleichmäßig in der Atmosphäre verteilen können. Die Hauptemissionsgebiete haben sich ab der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts von Europa und Nordamerika in zuvor weniger stark industrialisierte Erdteile verlagert, und zwar insbesondere nach Asien (Novakov et al. 2003). Für Asien wird für eine Reihe von Klimaänderungen der mögliche Beitrag von Rußpartikeln als wesentliche Ursache diskutiert. Dies betrifft die saisonale Umverteilung von

Niederschlägen mit der Folge von Dürren in Nordchina (Menon et al. 2002), die Zunahme sommerlicher Überflutungen im Süden Chinas (Menon et al. 2002), zunehmende Niederschläge in der Vormonsunzeit in Indien (Meehl et al. 2008), verringerte Monsunniederschläge in Teilen Indiens und Südostasiens (Meehl et al. 2008) und das Abschmelzen von Gletschern im Himalaya (Ramanathan und Carmichael 2008; Menon et al. 2010). In der mongolischen Hauptstadt Ulan Bator sind hohe Rußpartikelkonzentrationen während langanhaltender Inversionswetterlagen im Winter offensichtlich für den Anstieg der Wintertemperatur um stattliche 7,2 K (oder 1,1 K pro Dekade) von 1950 bis 2012 verantwortlich (Hauck et al. 2016).

Auch **Vegetationsbrände** setzen Rußpartikel frei; allerdings entstehen hierbei auch beträchtliche Mengen von Aerosolen aus organischem Kohlenstoff, die wiederum als Nukleationskerne die Wolkenbildung fördern (Haywood und Boucher 2000), was je nach Höhe der Wolken einen positiven oder negativen Effekt auf den Strahlungsantrieb hat. Es gibt in der Atmosphäre auch bedeutende Mengen von **Aerosolen** aus natürlichen Quellen, die direkt oder über die Förderung der Wolkenbildung die Sonneneinstrahlung am Boden reduzieren. Hierzu zählen Mineralstäube wie Wüstensand und Meersalz. Eine besonders wichtige Rolle nehmen Sulfat-Aerosole ein (Sokolik und Toon 1996; Ramanathan et al. 2001; Chung et al. 2005). Anthropogene Aerosole überwiegen heute jedoch in der Erdatmosphäre. Im 20. Jahrhundert haben sie bis in die 1980er-Jahre zu einer Verringerung der Globalstrahlung geführt; von 1960 bis 1990 ist die Globalstrahlung innerhalb von 30 Jahren um etwa 5 % zurückgegangen (Wild et al. 2005). Für diesen Rückgang wurde von Ohmura und Lang (1989) der Begriff *Global Dimming* (**globale Verdunkelung**) geprägt. Der Rückgang der Globalstrahlung durch die Verbrennung fossiler Energieträger und von Biomasse hat die Klimaerwärmung durch die dabei freigesetzten Treibhausgase abgeschwächt (Wild et al. 2007; Ohmura

2009; Wild 2009). Seit den 1990er-Jahren werden jedoch zwar nicht überall, aber doch im globalen Mittel steigende Werte für die Globalstrahlung gemessen (Wild et al. 2005), da die Emission anthropogener Aerosole durch Abgasreinigung, aber auch durch den Zusammenbruch der Industrie in Osteuropa zurückgegangen sind. Insbesondere im Fall der Sulfat-Aerosole, die aus Schwefeldioxidemissionen resultieren, ist die Senkung der Konzentration in der Atmosphäre zwar im Hinblick auf die Vermeidung toxischer Effekte und der Ansäuerung von Ökosystemen sinnvoll, die kühlende Wirkung der Aerosole wird damit aber ebenfalls verringert.

1.3 Räumliche Verteilung von Treibhausgasen und globaler Charakter des Treibhauseffektes

Die anthropogenen Quellen der Treibhausgase befinden sich überwiegend auf der Nordhalbkugel. Diese Verteilung führt zu **Nord-Süd-Gradienten** in der Konzentration vieler **Treibhausgase** in der Troposphäre. Dies schließt CO_2 (Enting und Mansbridge 1991; Gurk et al. 2008), CH_4 (Zimov et al. 1997; Saeki et al. 1998), die Halogenkohlenwasserstoffe (DeLorey et al. 1988) und SF_6 (Geller et al. 1997) ein. Bei N_2O tritt ein solcher Nord-Süd-Gradient nicht auf; stattdessen ist für dieses Spurengas die Konzentration in den Tropen am höchsten (DeLorey et al. 1988). Die räumlichen Konzentrationsgradienten sind allerdings meist relativ schwach ausgeprägt. Für CO_2 gingen Enting und Mansbridge (1991) bei globaler Betrachtung im Jahresmittel von nur 3 ppm aus. Gurk et al. (2008) zeigten bei im April 2003 vom Flugzeug ausgeführten Messungen über Europa, dass die CO_2 -Konzentration in der unteren Troposphäre bei 50° N um 2 ppm höher war als bei 35° N. Dieser Unterschied entsprach ungefähr dem jährlichen Anstieg der mittleren globalen CO_2 -Konzentration zu dieser Zeit (WMO 2013).

Auch im Vergleich zu **saisonalen Schwankungen** des CO_2 -Gehalts der Troposphäre, die sich zeitlich verzögert bis in die Stratosphäre fortpflanzen (Gurk et al. 2008), ist dessen räumliche Variabilität recht gering. Die jahreszeitlichen Schwankungen sind durch die verstärkte CO_2 -Aufnahme durch die Vegetation im Sommer bedingt und betragen in den borealen und temperaten Regionen der Nordhemisphäre in der Troposphäre etwa 10 bis 20 ppm (Nakazawa et al. 1991; Gurk et al. 2008). In den Tropen sind saisonale Unterschiede in der atmosphärischen CO_2 -Konzentration wegen der großenteils immergrünen Vegetation schwächer ausgeprägt und liegen oft bei 5 ppm und weniger (Nakazawa et al. 1991).

Die relativ geringe Ausprägung von regionalen Unterschieden in der Konzentration von CO_2 und anderen Treibhausgasen ist eine Folge ihrer langen **Verweildauer** in der Atmosphäre. Diese bewirkt, dass die Treibhausgase über mehrere Jahre **global verteilt** werden (Seinfeld und Pandis 2006). Die Verteilung der Gasmoleküle innerhalb einer Hemisphäre geht dabei allerdings sehr viel rascher vonstatten als der Transport zwischen Nord- und Südhalbkugel über die **innertropische Konvergenzzone** hinweg. SF_6 benötigt für den Transport von der Nord- in die Südhemisphäre etwa 1,0 bis 1,5 Jahre (Maiss und Levin 1994; Geller et al. 1997; Patra et al. 2009). Innerhalb einer Hemisphäre verteilen sich Gase innerhalb von wenigen Monaten (Bowman und Cohen 1997).

Aus den hohen Verweildauern von CO_2 und anderen durch menschliche Aktivitäten freigesetzten Treibhausgasen ergeben sich zwingend der **globale Charakter des Treibhauseffekts** und der daraus resultierende Klimawandel. Dies unterscheidet die Wirkung des CO_2 und anderer Treibhausgasen fundamental von regional wirksamen Substanzen mit kurzer Verweildauer in der Atmosphäre. Ein Beispiel für einen solchen Fall ist das Schwefeldioxid (SO_2), das für eine

Ansäuerung des Niederschlags und Schäden an der Vegetation verantwortlich ist (Schulze et al. 1989), die aber auf regionaler bis kontinentaler Skala stark in Abhängigkeit von Emissionsquellen und Luftmassentransport variieren. Aufgrund der großräumigen Verteilung der Treibhausgase in der Atmosphäre erwärmt sich das Klima auch in Regionen, in denen die Emissionen von Treibhausgasen gering sind. Die Frage, ob ein an einem Ort beobachteter lokaler Erwärmungstrend Bestandteil der globalen Klimaerwärmung oder nur regionaler Natur sei, stellt sich somit in der Regel nicht, da prinzipiell die gesamte Erde dem Einfluss der gestiegenen Konzentration von Treibhausgasen unterliegt. Eine Ausnahme bilden Erwärmungstrends, die durch lokale Aerosolemissionen verursacht werden (Hauck et al. 2016).

Der **Wirkung der Treibhausgase** auf das Klima auch in Gebieten **fernab der Emissionsquellen** bildet eine wesentliche Grundlage für die **ethische Verpflichtung** der reichen Industrienationen, weniger wohlhabende Staaten bei der **Bewältigung der ökologischen, ökonomischen und sozialen Folgen** des Klimawandels zu unterstützen. Der relative Anteil einzelner Regionen an der Nutzung fossiler Energieträger hat sich seit Beginn der Industrialisierung verändert (Andres et al. 1999). In der jüngeren Vergangenheit ist insbesondere ein erhöhter Verbrauch fossiler Energieträger im asiatischen Raum zu verzeichnen (Akimoto et al. 2006; Gregg et al. 2008). Teilweise ist der Anstieg der dortigen CO_2 -Emissionen auch die Folge der Auslagerung von industrieller Produktion aus anderen Ländern in die Region (Altenburg et al. 2008; Lin et al. 2014). Letzteres ist ein Aspekt, der bei der Bewertung von regionalen Rückgängen und Zuwächsen des CO_2 -Ausstoßes mit bedacht werden muss. Eine Senkung nationaler CO_2 -Emissionen durch Produktionsverlagerung ins Ausland verbessert zwar nationale Bilanzen, ist aber kein Beitrag zum globalen Klimaschutz.