

11. Treibhausklima

- 11.1 Emission und Absorption von Strahlung
- 11.2 Physik des Treibhauseffektes
- 11.3 Strahlungsbilanz der Erde
- 11.4 Zusammenhang zwischen CO₂ Gehalt und Temperatur
- 11.5 Biographie: Gustav Kirchhoff

Als wir im März und April des vorigen Jahres einen der schönsten Frühlinge unseres Lebens erlebten, konnten sich viele - wir auch - gar nicht so recht daran freuen. Wir fürchteten, dass dieses Geschenk vielleicht der Vorbote einer drohenden Klimakatastrophe sei, wofür wir später „büßen“ müssten. Das ist vielleicht sogar richtig. Die drohende Klimaveränderung durch den anthropogenen Treibhauseffekt, d.h. durch menschliche Aktivitäten hervorgerufene Veränderung der Atmosphäre beschäftigt nicht nur die Bürger, sondern auch die Weltpolitik, wie z.B. auf dem letzten G8-Gipfel. In dieser Vorlesung wollen wir die physikalischen Grundlagen des Treibhauseffektes und seine Wirkung auf das Klima besprechen.

11.1 Emission und Absorption von Strahlung

Ein heißer Körper, z.B. die Sonne, eine heiße Herdplatte oder ein Glühdraht, strahlt Wärme und Licht ab. Die physikalischen Gesetze hinter diesem Phänomen wurden im 19. Jahrhundert erforscht und führten u.a. zur Entdeckung der Quantenphysik durch Max Planck. In diesem Abschnitt wollen wir jedoch nicht die theoretischen Hintergründe beschreiben, sondern nur die wichtigsten Phänomene. Zur Vereinfachung wollen wir annehmen, dass der heiße Körper, die Strahlungsquelle, eine feste Temperatur hat und sich im Vakuum befindet. Das Vakuum sorgt dafür, dass andere Prozesse des Wärmetransports wie Wärmeleitung und Konvektion ausgeschlossen sind und die von der Quelle abgegebene Strahlung rein elektromagnetischer Natur ist. Diese Strahlung ist durch zwei Größen charakterisiert: die „Farbe“ der Strahlung, die durch die Wellenlänge λ quantifiziert wird, und die in den Raum abgestrahlte Energie. Beide Kenngrößen hängen von der Temperatur ab, wobei diese Abhängigkeit einfacher wird, wenn man die absolute Temperatur T verwendet. (Die absolute Temperatur T wird in Kelvin [K] angegeben und es gilt $T = \vartheta + 273$, wobei ϑ die in °C angegebene Temperatur ist.)

Schon aus dem Alltag wissen wir, dass die Wärmestrahlung einer nur mäßig heißen Herdplatte für das Auge nicht sichtbar ist, jedoch gefühlt und mit geeigneten Geräten gemessen werden kann.

Versuch: Strahlung und Temperatur

Ein Draht wird von Strömen verschiedener Stärke durchflossen und ändert dabei kontinuierlich seine Temperatur. Schon bevor er rötlich zu glühen beginnt, kann man in seiner Umgebung die Wärmestrahlung spüren bzw. mit einem Strahlungsmessgerät nachweisen. Die verwendete Thermosäule nach Moll ist so empfindlich, dass sie sogar die Körperstrahlung eines Menschen anzeigt.

Bei höherer Temperatur wird die Herdplatte bzw. der Draht erst dunkel- dann hellrot; heißglühendes Eisen oder der Draht einer Glühbirne senden gelblich-weißes Licht aus. Auch von der Sonne kommt weißes Licht zu uns, das allerdings aus einem Spektrum verschiedener Farben besteht, die z.B. in einem Regenbogen zu sehen sind.

Ein Beispiel für eine Wellenlängenverteilung des von einer heißen Strahlungsquelle ausgesandten Lichts, die sog. Planckverteilung, ist in Abb.1 dargestellt. Sie zeigt die Strahlungsverteilungen von Körpern verschiedener Temperatur T . Darin enthalten ist ein sichtbarer Anteil, in dem für $T = 6000 \text{ K}$ das Intensitätsmaximum bei der Wellenlänge $\lambda_{\text{max}} = 0,5 \mu\text{m}$ liegt. Unterhalb von $0,4 \mu\text{m}$ befindet sich der ultraviolette und oberhalb von $0,8 \mu\text{m}$ der infrarote Bereich.

Die von einem heißen Körper ausgesandte Strahlung wird durch verschiedene Gesetze beschrieben, von denen wir nun das sog. Wiensche Verschiebungsgesetz betrachten möchten: Es sagt aus, dass die Wellenlänge λ_{max} , bei der die Intensität der ausgesandten Strahlung ihr Maximum hat, proportional zu $1/T$ ist, d.h. λ_{max} ist umso kleiner, je höher die Temperatur ist.

Versuch: Temperatur und Farbe

Das weiße Licht einer Experimentierlampe, das dem der Sonne ähnlich ist, wird spektral zerlegt. Erniedrigt man langsam die Betriebsspannung und damit die Temperatur, so wird nicht nur die Lichtintensität insgesamt geringer, sondern man kann zusätzlich beobachten, dass zunächst die Blauanteile und zuletzt der rote Anteil des Spektrums verschwinden.

Hierzu einige Beispiele: Auf der Sonnenoberfläche herrscht eine Temperatur von ca. 6000 K , und das ausgesandte Licht hat bei der Wellenlänge $\lambda_{\text{max}} \approx 0,5 \mu\text{m}$ ihr Intensitätsmaximum. Eine Herdplatte mit $327^\circ\text{C} = 600 \text{ K}$ sendet daher Strahlung mit einem Maximum bei $\lambda_{\text{max}} = 5 \mu\text{m}$ aus. Diese Wellenlänge liegt im sog. Infrarotbereich, für den unser Auge nicht empfindlich ist. Auch die Erdoberfläche, deren gemittelte Temperatur bei ca. $15^\circ\text{C} \approx 300 \text{ K}$ liegt, strahlt ein Wärmestrahlspektrum ab, bei dem $\lambda_{\text{max}} \approx 10 \mu\text{m}$ beträgt.

Wenden wir uns jetzt dem Spektrum des Sonnenlichts zu, das im nächsten Bild zu sehen ist. Die gelbe Fläche gibt die von der Sonne ausgestrahlte Intensitätsverteilung an, die rote den auf der Erde ankommenden Anteil. Der Unterschied kommt zustande durch Reflexion an und Absorption in der Atmosphäre. Auffallend sind die „Zahnlücken“, d.h. diejenigen Bereiche, in denen das Licht praktisch vollständig absorbiert wird. An diesen Lücken sind die Namen der chemischen Verbindungen aufgeführt, die jeweils für diese Absorption verantwortlich sind: es sind die Gase Ozon (O_3) und Kohlenstoffdioxid (CO_2) sowie der Wasserdampf (H_2O). Die Selektivität der Absorption ist ein Quantenphänomen. Je nach ihrer inneren Struktur hat ein Molekül angeregte Zustände mit jeweils für diese Verbindung charakteristischen Anregungsenergien. Trifft nun ein Strahlungsquant mit der passenden Energie, d.h. mit der passenden Wellenlänge auf das Molekül, wird es von diesem absorbiert und fehlt dann in der Strahlung, die von der Sonne auf die Erde trifft. In den meisten Fällen stößt das angeregte Molekül mit anderen Molekülen zusammen, wandelt dabei seine Anregungsenergie in Bewegungsenergie (d.h. Wärme) um und heizt die Atmosphäre auf. Dieser Prozess ist mitverantwortlich für den sog. Treibhauseffekt.

Versuch: Absorptionslinie in einem kontinuierlichen Spektrum

Das weiße Licht einer Kohlebogenlampe wird durch ein Gefäß mit Natriumdampf geschickt und anschließend spektral zerlegt. An der Stelle, an der eine Natriumlampe eine gelbe Emissionslinie zeigt, ist nun im hellen Spektrum eine dunkle Absorptionslinie zusehen.

11.2 Physik des Treibhauseffektes

Die Treibhäuser, in denen Gemüse oder Blumen angebaut werden und in denen es häufig heiß und schwül ist, wirken für das Licht wie eine Reuse für Fische. Eine Fischreuse ist ein trichterförmiges Geflecht oder Netz, in das ein Fisch hinein- aber nicht mehr herausfindet.

In ein Treibhaus dringt der allergrößte Teil des Sonnenlichts nahezu ungehindert ein und wärmt das Innere, d.h. die Pflanzen und den Boden, auf. Aber die von diesen aufgewärmten Objekten ausgesandte Strahlung kann das Treibhaus durch das Glas nicht mehr verlassen. Denn Glas ist nur für sichtbares Licht und nahe Infrarotstrahlung durchsichtig, aber nicht für die Wärmestrahlung, die von Objekten mit der Temperatur von 20 bis 30°C ausgestrahlt wird.

Versuch: Transmission von Glas für Licht- und Wärmestrahlung

Es wird die Durchlässigkeit von Glas für das aus verschiedenen Strahlungsquellen stammende Licht mit einer Thermosäule untersucht. Während sichtbares Licht durch Glas nahezu nicht geschwächt wird, gelangt die von einer Wärmequelle ausgehende Strahlung nicht durch das Glas.

Die Wärme wird also im Treibhaus „gefangen“ wie der Fisch in der Reuse. Sie kann nur teilweise und dann als warme Luft entweichen, weil das Treibhaus i.a. nicht ganz dicht ist. In der Abb. 2 zeigen wir die Intensität der Sonnenstrahlung und die Intensität der Wärmestrahlung der Erde als Funktion der Wellenlänge. Man sieht sehr gut, dass die Strahlung der Erde gegenüber der Sonnenstrahlung in der Wellenlänge verschoben ist. Darunter ist – auch als Funktion der Wellenlänge - die Durchlässigkeit verschiedener Glassorten gezeigt. Im Wellenlängenbereich der Sonnenstrahlung ist Glas gut durchlässig, aber für Wellenlängen $\lambda > 3 \mu\text{m}$, d.h. gerade im Bereich der Wärmestrahlung, werden alle Glassorten undurchlässig.

Versuch: Absorption von Wärmestrahlung durch verschiedene Gase

Wärmestrahlung wird zunächst durch ein mit Luft gefülltes Rohr auf ein Strahlungsmessgerät geschickt. Anschließend wird das Rohr mit verschiedenen Gasen gefüllt, wobei sich ein deutlicher Abfall der ankommenden Strahlungsintensität nachweisen lässt. Die gemessene Intensität wird mit einem Messwertaufnahmesystem als Funktion der Zeit aufgezeichnet.

In gewissem Sinne wirkt die Atmosphäre, die die Erde umgibt, wie das Glas eines Treibhauses. Wie Abb. 1 zeigt, ist die Atmosphäre für das Sonnenlicht bis auf kleine Wellenlängenbereiche durchlässig, aber je nach der Konzentration der sog. Treibhausgase ist sie für die von der Erde abgestrahlte Wärmestrahlung undurchlässig. Zu den Treibhausgasen gehören u.a. Wasserdampf, Kohlendioxid und Methan, wobei die beiden letzteren einen anthropogenen, d.h. durch menschliche Aktivitäten produzierten Anteil besitzen.

11.3 Strahlungsbilanz der Erde

Die Abb. 3 zeigt schematisch die Energiebilanz der Erde, die aus der Energie des einfallenden und teilweise an der Atmosphäre reflektierten Sonnenlichtes und der vom System Erde ausgesandten Strahlung besteht. Bei konstanter mittlerer Temperatur auf der Erde müssen sich einfallende und abgestrahlte Energie im zeitlichen Mittel natürlich die Waage halten

Von der einfallenden Sonnenenergie werden 49% in der Atmosphäre reflektiert bzw. in Wärme umgewandelt, so dass nur 51% auf der Erdoberfläche ankommen und dort Land und Wasser erwärmen. Diese auf der Erdoberfläche ankommende Energie wird wieder an die Atmosphäre abgegeben durch

- Konvektion durch aufsteigende warme Luft und durch Verdunstung von Wasser (30%) und
- Wärmestrahlung (21%).

Von dieser Wärmestrahlung wird ungefähr drei Viertel, d.h. 15% der einfallenden Sonnenenergie in der Atmosphäre absorbiert, der Rest (6 %) wieder in den Weltraum abgestrahlt. Beim Treibhauseffekt geht es um diesen Anteil, dessen Verhältnis durch die Treibhausgase beeinflusst wird. Die durch die verschiedenen Effekte aufgeheizte Atmosphäre strahlt teilweise in den Weltraum und teilweise wieder zur Erde zurück. Das ist schon immer so gewesen (wir sprechen deshalb auch vom natürlichen Treibhauseffekt) und ist dafür verantwortlich, dass die Temperatur der Erdoberfläche im Jahresmittel nicht -18°C (ohne Atmosphäre) sondern $+15^{\circ}\text{C}$ (mit Atmosphäre) beträgt. Wenn sich nun aber wegen der vermehrten Treibhausgase aus menschlichen Aktivitäten die Absorption von Wärmestrahlung in der Atmosphäre erhöht, erhöht sich auch die Rückstrahlung und damit die mittlere Temperatur der Erdoberfläche. Wir sprechen in diesem Fall von dem anthropogenen Anteil am Treibhauseffekt oder einfach vom anthropogenen Treibhauseffekt. Die Beobachtungen und Voraussagen ergeben dafür Werte von einigen $^{\circ}\text{C}$. Dieser Betrag ist zwar klein gegenüber dem Wert von 33°C für die Temperaturerhöhung aus dem natürlichen Treibhauseffekt, aber schon wenige Grad können das Klima auf unserer Erde entscheidend verändern.

11.4 Zusammenhang zwischen CO_2 -Gehalt der Atmosphäre und mittlerer Erdtemperatur

Der gesamte Treibhauseffekt wird hauptsächlich durch folgende Gase verursacht:

- Wasserdampf (ohne Berücksichtigung der Effekte der Wolken), ca. 36-70 %,
- Kohlendioxid ca. 9-26 %,
- Methan ca. 4-9 % und
- Ozon ca. 3-7 %.

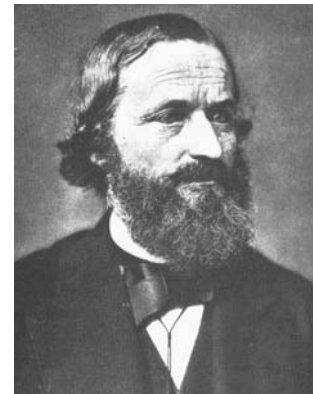
Ein exakter Prozentanteil der o.a. Gase auf den Treibhauseffekt kann nicht angegeben werden, da der Einfluss der einzelnen Gase je nach Breitengrad und Vermischung variiert. Die menschlichen Aktivitäten seit dem Beginn des industriellen Zeitalters vor etwa 200 Jahren, haben insbesondere den Anteil des Kohlendioxids in der Atmosphäre erhöht. Deshalb wollen wir uns in dieser Vorlesung um den Zusammenhang der CO_2 -Konzentration und der mittleren Temperatur auf der Erde beschäftigen. Dieser Zusammenhang konnte während der letzten 750 000 Jahre z.B. aus Eisbohrkernen empirisch ermittelt werden (Abb.). Man sieht, dass die Veränderungen des CO_2 Gehaltes und die der Temperatur auf der Erdoberfläche sehr

gut korreliert sind. Allerdings hat man, soweit wir wissen, noch nicht verstanden, warum der CO_2 -Gehalt mit der Zeit so stark variiert. Dennoch ist diese empirische Korrelation eine starke Stütze für die Voraussagen einer globalen Erwärmung auf Grund des steigenden CO_2 -Gehaltes in der Atmosphäre. Die Veränderung dieser Konzentration in den letzten 200 Jahren zeigt einen dramatischen Anstieg von ca. 30 %. Entsprechend stieg die mittlere Temperatur in den letzten 100 Jahren um etwa $0,5^\circ\text{C}$. Diese Erhöhung erscheint gering; dennoch hat sie bereits in unserem subjektiven Empfinden zu deutlichen Wetterveränderungen geführt, z.B. wärmeren Sommern in den letzten 20 Jahren (siehe Tabelle).

Detaillierte Voraussagen über die Stärke der Klimaveränderung und ihre regionalen Auswirkungen sind heute noch stark umstritten. Sie werden durch Unsicherheiten in den Prognosen über das wirtschaftliche Wachstum auf der politischen Seite sowie durch die Unvollkommenheit der benutzten Klimamodelle auf der wissenschaftlichen Seite begrenzt. Unbestritten ist jedoch, dass der anthropogene Treibhauseffekt zu einer bedeutenden Klimaveränderung im 21. Jahrhundert führen und die Lebensverhältnisse der Menschen entscheidend verändern wird.

11.5 Biographie: Gustav Robert Kirchhoff (1824-1887)

Kirchhoffs Vater war preußischer Justizrat in Königsberg, wo auch sein Sohn Gustav geboren wurde. Kirchhoff wurde zunächst von Privatlehrern unterrichtet und besuchte dann das Kneiphöfische Gymnasium, an dem er zu Ostern 1842 das Abitur ablegte. Anschließend studierte er Mathematik und Physik an der Albertus Universität in Königsberg und hatte in den Mathematikern Jakobi und Richelot und in dem Physiker Franz Neumann, der als erster auch Vorlesungen in mathematischer Physik hielt, hervorragende Lehrer. Kirchhoff war von Neumann so begeistert, dass er sich bald ganz der Physik zuwandte.



Seine erste wissenschaftliche Arbeit zum Stromdurchgang durch eine Ebene veröffentlichte der studiosus Kirchhoff bereits mit 21 Jahren in den Annalen der Physik und Chemie. Sie entstand aus einer Seminaraufgabe und hat den Titel "Über den Durchgang eines elektrischen Stromes durch eine Ebene, insbesondere durch eine kreisförmige". Im Anhang hierzu sind die nach ihm benannten Gesetze für verzweigte Stromkreise zu finden, mit denen er das Ohmsche Gesetz auf kompliziertere Situationen verallgemeinerte

Das Signet des Heidelberger Kirchhoff-Instituts geht auf Ergebnisse aus dieser Arbeit zurück; es zeigt Äquipotentiallinien auf einer kreisförmigen Metallplatte.

Eine Preisaufgabe aus dem Jahre 1846, bei deren Lösung Kirchhoff erstmals die Induktionskonstante μ_0 bestimmte, wurde ihm als Doktorarbeit anerkannt. Nach seiner Promotion (1847) erhielt Kirchhoff ein Stipendium, mit dem er eigentlich nach Paris gehen wollte. Da die Zeit politisch ein wenig unruhig war, folgte er dem Rat seiner Lehrer und ging nach Berlin, wo er sich bereits ein Jahr später habilitierte. Nachdem er zwei Jahre in Berlin als unbezahlter Privatdozent gelehrt hatte, erhielt er im Jahre 1850 eine Stelle als Extraordinarius in Breslau. Bald darauf kam auch der Chemiker Robert Wilhelm Bunsen nach Breslau und zwischen den beiden entwickelte sich eine tiefe,

langandauernde Freundschaft. Bunsen verließ Breslau wieder relativ schnell, da er einen Ruf nach Heidelberg erhalten hatte. Als dann 1854 in Heidelberg der Lehrstuhl für Experimentalphysik frei wurde, machte sich Bunsen für die Verpflichtung Kirchhoffs stark. Kirchhoff erhielt den Ruf und wurde als Nachfolger von Philipp Jolly ordentlicher Professor und Direktor des Physikalischen Kabinetts. Es begann eine äußerst fruchtbare Zusammenarbeit mit Bunsen, aus der bahnbrechende Entdeckungen und Erkenntnisse hervorgingen. Schon bald war Kirchhoff erfüllt von der anregenden akademischen Atmosphäre, die in Heidelberg herrschte und insbesondere von einem Kreis um Helmholtz verbreitet wurde. In diese Zeit fällt auch seine Hochzeit mit Clara Richelot, der Tochter seines Mathematikprofessors in Königsberg, die ihm insgesamt 5 Kinder schenkte.

So wurden die 21 Jahre, die Kirchhoff in Heidelberg verbrachte, wohl die schönsten und fruchtbarsten in seinem Leben. In dieser Zeit entstanden etwa zwei Drittel seiner Veröffentlichungen; er begründete zusammen mit Bunsen die Spektralanalyse, entdeckte zwei neue Elemente (Cs und Rb) und konnte die Fraunhoferschen Linien im Sonnenspektrum erklären. Er entwickelte in diesem Zusammenhang ferner sein Strahlungsgesetz, führte den Begriff des Schwarzen Körpers ein und fand den Einstieg in die Physik der Sonne. Hieran erinnert u.a. eine Tafel, die am Haus zum Riesen in der Heidelberger Hauptstrasse angebracht ist und auf der zu lesen ist: *"In diesem Haus hat KIRCHHOFF 1859 seine mit Bunsen begründete SPEKTRALANALYSE auf die Sonne und Gestirne gewandt und damit die Chemie des Weltalls erschlossen"*.

Da er neben seinen Forschungsaufgaben auch seine Lehrverpflichtungen mit großem Ernst erfüllte, blieb es nicht aus, dass er mehrere Angebote auf angesehene Lehrstühle, u.a. in Berlin erhielt. Da er und seine Familie sich in Heidelberg jedoch sehr wohl fühlten, sagte er auch mehrmals ab.

Es waren jedoch nicht nur glückliche Tage. Im Jahre 1860 überanstrengte Kirchhoff seine Augen bei der Beobachtung des Sonnenspektrums. Sechs Jahre später verletzte er sich bei einem Sturz den Fuß so stark, dass er längere Zeit an Krücken gehen musste oder auf einen Rollstuhl angewiesen war. Dieses Leiden, von dem er sich nie wieder ganz erholte, hatte zur Folge, dass er nicht mehr in der Lage war, die Experimentalvorlesung zu halten. Hinzu kam, dass seine erste Frau im Jahre 1869 starb. Er heiratete zum zweiten Mal im Dezember 1872, und seine zweite Frau Luise Brümmel stand ihm bis zu seinem Tode aufopfernd bei.

Zur damaligen Zeit gab es in Deutschland praktisch keinen Lehrstuhl für Theoretische bzw. Mathematische Physik. Als Kirchhoff 1874 einen Ruf auf eine gutbezahlte Stelle an der Preußischen Akademie der Wissenschaften verbunden mit einem Ordinariat an der Universität Berlin erhielt, entschloss er sich, diesen ersten Lehrstuhl für Theoretische Physik anzunehmen und Heidelberg zu verlassen.

Das Leben in Berlin war nicht mit dem in Heidelberg zu vergleichen, und Kirchhoffs Frau fiel die Umstellung schwer. Auch Kirchhoff selbst hatte nicht mehr Wohnung, Institut und Hörsaal in einem Hause, sondern musste lange Wege zur Universität und Akademie auf sich nehmen. Allerdings konnte er hier ein ruhiges und intensives Gelehrtenleben führen und sich mit voller Kraft seinen Vorlesungen widmen. Er entwickelte bald die erste Kursvorlesung in Theoretischer Physik, die auf 4 Semester aufgeteilt war und die Themen Mathematische Optik, Theorie der Wärme, Theorie der Elektrizität und des Magnetismus und Mechanik fester und flüssiger Körper umfasste.

Dennoch blieb ihm genügend Zeit, neue Freundschaften, u.a. mit Werner von Siemens, zu schließen und am wissenschaftlichen Leben in der Hauptstadt teilzunehmen.

Nach etwa 5 Jahren begann sein Gesundheitszustand sich zu verschlechtern und im Sommersemester 1884 rieten ihm seine Ärzte, die Vorlesung abzubrechen. Im darauf folgenden Wintersemester begann er die Vorlesungen noch einmal unter großen Anstrengungen, doch schon bald verschlechterte sich seine Gesundheit abermals. Er litt unter Schwindel und Fieberanfällen, die vermutlich auf einen Hirntumor zurückzuführen waren. Gustav Kirchhoff ertrug seine Leiden mit bewundernswerter Geduld. Bis zu seinem Tode im Oktober 1887.

Sein Nachfolger in Berlin wurde Max Planck, der u.a. auch Kirchhoffs Arbeiten zur Strahlung fortführte und damit die Quantentheorie begründete.

Quellen:

1. <http://www.kip.uni-heidelberg.de/OeffWiss/Faltblatt/Faltblatt-Kirchhoff.php>
2. <http://www-groups.dcs.st-and.ac.uk/~history/Mathematicians/Kirchhoff.html>
3. http://de.wikipedia.org/wiki/Gustav_Robert_Kirchhoff
4. http://leifi.physik.uni-muenchen.de/web_ph08_g8/geschichte/07kirchhoff/leben_kirchhoff.htm
5. <http://web.hao.ucar.edu/public/education/sp/images/kirchhoff.html>