

Walter Hehl

# Klimawandel – Grundlagen und Spekulation

Wie und warum es so kommen  
musste und weiter  
kommen muss



SACHBUCH



Springer

# Klimawandel – Grundlagen und Spekulation

Walter Hehl

# Klimawandel – Grundlagen und Spekulation

Wie und warum es so kommen musste  
und weiter kommen muss

 Springer

Walter Hehl  
Thalwil, Schweiz

ISBN 978-3-658-35540-1      ISBN 978-3-658-35541-8 (eBook)  
<https://doi.org/10.1007/978-3-658-35541-8>

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

© Der/die Herausgeber bzw. der/die Autor(en), exklusiv lizenziert durch Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, ein Teil von Springer Nature 2021

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von allgemein beschreibenden Bezeichnungen, Marken, Unternehmensnamen etc. in diesem Werk bedeutet nicht, dass diese frei durch jedermann benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des jeweiligen Zeicheninhabers sind zu beachten.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Einbandabbildung: Kunstwerk „Mano del Desierto“ von Mario Irarrázabal, photo: © yesica/stock.adobe.com

Planung/Lektorat: Daniel Froehlich

Springer ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH und ist ein Teil von Springer Nature.

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Abraham-Lincoln-Str. 46, 65189 Wiesbaden, Germany

# Vorwort

Wir stehen nun an einem Wendepunkt zwischen zwei grossen Zeitabschnitten. Hinter uns ist eine Vergangenheit, zu der wir nie wieder zurückkehren können, selbst wenn wir es wollen ... die ganze Geschichte der Menschheit vor dem 20. Jahrhundert scheint nur ein Vorspiel zu sein für ein grosses Drama.

Arthur C. Clarke, *The Exploration of Space*, Tauchnitz 1952.

Arthur Clarke, Schriftsteller und Pionier der Raumfahrt, ist in seinem Büchlein voller Vorfreude und Optimismus bezüglich der kommenden Epoche der Raumfahrt. Die Sätze können wir auch auf heute übertragen. Aber der wichtigste Wendepunkt hat düstere Vorzeichen. Es ist der globale Klimawandel.

Dieses Buch ist gedacht für alle, die ohne spezielles Fachwissen (und ohne Formeln) die Grundlagen verstehen wollen. Es gibt zum Klima-Thema viele zusammenwirkende Bereiche aus Physik, Chemie und Systemtheorie. Damit sind viele Fakten zu klären und wir versuchen, eine Art von Allgemeinbildung zum Thema zu liefern: Die Entwicklung des Wissens von Newton und Fourier bis heute. Es ist eine Ironie der Wissenschafts- und Technikgeschichte, dass die entstehende physikalische Wärmelehre auch die Technik für die Wärmekraftmaschinen geliefert hat, die den heutigen Klimawandel bewirkt haben.

Um 1950 herrschte in der Wissenschaft noch Unentschlossenheit, ob wir einer globalen Erwärmung oder einer Abkühlung entgegen arbeiten! Wir versuchen zu zeigen, dass diese Unsicherheit eine notwendige und typische Stufe des Wissenschaftsbetriebs ist. Dazu kommen die Verflechtungen der

naturwissenschaftlichen Themen mit der Entwicklung der Technologien sowie die Verbindungen zu Politik und Philosophie.

Das Buch beginnt im ersten Teil mit dem Aufkommen der Ideen der Wissenschaft vom Klima und Klimawandel. Die Grundbegriffe beginnen überraschenderweise bei Newton. Die geschichtliche Einleitung führt bis zum zuverlässigen Verständnis der globalen Erwärmung.

Im zweiten Teil gehen wir auf die Problematik der wissenschaftlichen Themen ein. Wir streifen die wichtigsten Gebiete und fragen uns, was überhaupt wissenschaftlich sein kann.

Der dritte Teil analysiert technische Fragen und Aufgaben, die uns die Erwärmung stellt. Im vierten Teil diskutieren wir die menschliche Seite des globalen Klimawandels, demonstrieren die grosse Unsicherheit und zeigen auf, was von Nöten wäre. Wir kommen nicht ungeschoren davon, aber es gibt noch Hoffnung.

Es geht in der Gesellschaft um die Phasen der Akzeptanz des Gedankens, dass wir Menschen das Klima ändern. Die erste Phase war eine dominierende Ablehnung (noch möglich im Rahmen der damaligen Wissenschaft). Die zweite Phase war (neben fortgesetzter Ablehnung) die Akzeptanz der Idee, man müsse nur Klimaschutz betreiben und der Klimawandel lasse sich zurückdrehen. Es sei eben fünf vor zwölf. Heute sind wir in der dritten Phase des Klimawandels. Nach dem (fast gänzlichen) Verschwinden totaler Leugner eines Klimawandels stehen immer noch viele politische Aussagen und Forderungen im Raum, die unrealistisch sind. In einem Unternehmen würde man bei einer Investition eine Kosten-Nutzungs-Rechnung durchführen. Bei den heute dominierenden Klimaschutz-Vorschlägen gilt dies offensichtlich nicht. Die Massnahmen weisen irgendwie in die richtige Richtung, aber ein Schutzeffekt ist nicht klar, jedenfalls nicht in naher Zukunft. Das Wort *Klimaschutz* ist ein ungeschickter Begriff. Es ist so, als ob wir im Zug beschleunigt losfahren, aber unseren Ausgangspunkt durch *Ortsschutzmassnahmen* zurückbekämen.

Es werden auch ungewohnte Ideen im Buch stehen. Die Aussagen zur Zukunft sind naturgemäss nicht von der gleichen wissenschaftlichen Härte wie die naturwissenschaftlichen Grunddaten oder die Episoden der Vergangenheit.

Der Autor hat versucht, aus seiner pragmatischen Erfahrung und aus allen Informationen als ehrlicher Makler die Schlüsse zur Zukunft zu ziehen.

Es wird notwendig sein, auf lange Zeit – Jahrhunderte, ja Jahrtausende – mit dem Klimawandel zu leben, und noch Jahrzehnte mit fortschreitender Erwärmung. Eine detaillierte Rückkehr des Klimas zum Status vor der Industrialisierung wird es nicht geben. Das heisst natürlich nicht, den Umbau zu einer nachhaltigen Welt nicht voranzutreiben. Aber es bedeutet, nicht naiv zu sein, sondern die ganze Realität zu erfassen und Veränderungen vorauszusehen und sich vorzubereiten.

Das Klima ist kein starr zusammengesetztes System. Wir überschätzen leicht unser Verstehen und Vorhersagen; deshalb betonen wir im Buch die klaren Umstände, etwa den Rückgang der Gletscher und präzise Messwerte wie den CO<sub>2</sub>-Gehalt der Luft. Ich habe versucht, alle Spekulationen zu begründen. Natürlich besteht kein Zwang, diesen Ideen zuzustimmen – aber eine Aufforderung, sie zu diskutieren. Einige meiner philosophischen Spekulationen sind ja sogar verheissungsvoll, freundlicher als jene Jonathan Franzens (Franzen, 2020). Die Zukunft wird entscheiden.

Es liegt in der dynamischen und komplexen Natur der klimatischen Prozesse, dass manche Zahlen grosse Fehlertoleranzen haben und verschiedene Werte in der Literatur zu finden sind. Aber es geht um die Grössenordnungen. So können wir beurteilen, was sicher und verstanden ist, was sicher und wenig verstanden, und was unsicher und nicht verstanden. Wir werden übrigens auch von Energieerzeugung reden; bei der Sonne ist dies zutreffend, auf der Erde ist der Begriff falsch aber eben üblich obwohl die Energie erhalten bleibt.

Eine Bemerkung zu den Zitaten: Ich glaube, zu einem Wissensgebiet gehören auch die Meinungen und die Geistesblitze anderer. Sie sind meistens nicht als Bestätigung gedacht, sondern als Denkanstösse. Es macht hoffentlich Vergnügen, sie zu lesen und sie vielleicht sogar zu widerlegen.

Ein Argument für Zitate habe ich vom Direktor der IBM Forschungsorganisation, Paul Horn, etwa im Jahr 2005, gelernt:

Egal, wie viele gute Leute du hast, draussen hat es noch mehr.  
Paul Horn, US-amerikanischer Informatiker, geb. 1944.

Sein Votum war als Argument gedacht, mit anderen Forschungsorganisationen zusammen zu arbeiten. Die IBM Forschung war damals (und ist es vielleicht auch heute) die beste industrielle Forschungsorganisation im Computerbereich.

## VIII Vorwort

Ich glaube, Entsprechendes gilt für Zitate und die kulturelle Welt. Egal wie viele gute Gedanken man hat, draussen hat es noch mehr. In einem bislang so umstrittenen Bereich wie dem globalen Klimawandel gibt die Menge der Zitate auch einen Einblick in die verschiedenen Ansichten. Dabei stösst man auch auf kuriose Gedanken – aber dies ist schon menschliche Zeitgeschichte.

Noch eine Warnung ist mir wichtig: Glauben Sie keinem Autor in Energiefragen, der so etwas schreibt wie *es sind x kW im Jahr!*

Walter Hehl



# Dank

Der US-amerikanische Autor Jonathan Franzen (geb. 1959) hat nicht nur erfolgreiche Romane geschrieben, sondern ab 2017 auch aufsehenerregende Thesen zum Klimawandel aufgestellt. Insbesondere stellt er sich gegen die Möglichkeit, *den Klimawandel zu stoppen* im Sinne von Aufforderungen wie *Wir haben noch zehn Jahre Zeit den Planeten zu retten*. Er will die langfristigen Effekte weitgehend akzeptieren und lokale Projekte mehr unterstützen. Seine Artikel und sein Büchlein (Franzen, 2020) zu diesem Thema haben mich in einigen Gedanken bestärkt und zu einem NZZ-Artikel geführt (Hehl, 2020) und nun zu diesem Buch. Allerdings ist mein Ausblick nicht ganz so pessimistisch wie der von Franzen.

Ich bedanke mich bei Jonathan Franzen für seine persönliche Empfehlung, ein Buch zum Klimawandel zu schreiben. Meine ersten Gedanken zum Thema rühren bereits von Diskussionen mit Studenten, etwa im Jahr 1980, denen ich riet, nicht nur gegen Atomkraftwerke zu protestieren, sondern auch gegen Kohlekraftwerke.

Ich bedanke mich für freundliche Korrespondenz bei vielen Klimatologen und Klimainteressierten:

Anna Ahn, Climeworks, Zürich,  
Anders Andrae, Mikroelektronik, Huawei, Schweden,  
Néle Azevedo, Bildhauerin, Brasilien,  
John Cook, Kognitionswissenschaftler, Australien,  
Thomas Frölicher, Physiker, Universität Bern, Schweiz.  
Hall, Charles, Biologe, State University New York, USA.  
William Happer, Physiker, Princeton, USA,

## X Dank

Mojib Latif, Meteorologe, Kiel, Deutschland,  
Robert Page, Berater, Center of Negative Carbon Emissions, Arizona, USA,  
John Perlin, Historiker der Sonnenenergie, Kalifornien,  
Stephen Salter, Ingenieur, University Edinburgh,  
Fritz Scholz, Biochemiker, Universität Greifswald,  
Warren Stannard, Physiker, University Western Australia,  
Roland Stull, Physiker, Vancouver, Kanada,  
Henning Wagenbreth, Cartoonist, Berlin,  
William van Wijngaarden, Physiker und Informatiker, Universität von York.

Dies muss nicht bedeuten, dass diese Damen und Herren meine Ansichten im Buch teilen und umgekehrt ebenfalls nicht.

Meiner Frau Edith danke ich für ihre Geduld und das gründliche Lektorat. Jegliche sprachlichen Fehler im Text sind durch meine nachträglich ungeprüft eingebrachten Korrekturen entstanden und gehen ganz zu meinen Lasten.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung und Geschichtliches: Von der Wärmelehre zum Treibhaus Erde</b>	<b>1</b>
1.1	Der Beginn der Wärmelehre und des Treibhauseffekts	1
1.1.1	Joseph Fourier und der Glashaus-Effekt	1
1.1.2	Sir Isaac Newton	5
1.1.3	Horace-Bénédict de Saussure	8
1.1.4	Friedrich Wilhelm Herschel und das Infrarote	10
1.1.5	Eunice Newton Foote und John Tyndall	12
1.1.6	Johann Wilhelm Ritter und das Ultraviolette	17
1.1.7	Louis Agassiz und Karl Friedrich Schimper	20
1.2	Der Weg zum Verstehen des globalen Klimawandels	22
1.2.1	Svante Arrhenius	22
1.2.2	Die Zeit der grossen Unsicherheit: kühler oder wärmer?	30
1.2.3	Die globale Erwärmung ist klar (Phase III)	49
1.3	Geschichte auf den Punkt gebracht	83
<b>2</b>	<b>Ausgewählte wissenschaftliche Themen zur Globalen Erwärmung</b>	<b>87</b>
2.1	Wann ist eine Aussage (pseudo-) wissenschaftlich?	87
2.2	Warum ist Sauerstoff kein Treibhausgas, Wasserdampf schon?	103
2.3	Kohlendioxid: Gift, Lebenskraft und Treibhausgas	106
2.3.1	Kohlendioxid: Das freundliche Gas	106
2.3.2	Kohlendioxid: Das sanfte Gift	108

## XII Inhaltsverzeichnis

2.3.3	Kohlendioxid und die Pflanzen	110
2.3.4	Kohlendioxid als Treibhausgas in der Atmosphäre	118
2.4	Die Energiebilanz der Atmosphäre	121
2.5	Mehr Treibhausgase	130
2.5.1	Das Messen des Treibhauseffekts	130
2.5.2	Methan	132
2.5.3	Lachgas	153
2.5.4	Ozon	160
2.5.5	Die Fluorchlorkohlenwasserstoffe, die nützlichen Ozonkiller	170
2.6	Die Spektren, die vielleicht das Schicksal der Menschheit bestimmen: Sättigung oder nicht?	179
2.7	Aerosole und Wolken	184
2.7.1	Russ	186
2.7.2	Mineralische Aerosole	189
2.7.3	Schwefel und Sulfat-Aerosole	194
2.8	Astronomie und Klimawandel	205
2.8.1	Das Paradox der schwachen jungen Sonne	206
2.8.2	Schwankungen über historische Zeiten hinweg	208
2.8.3	Klimaschwankungen durch die Elemente der Erdbahn	211
2.8.4	Milankoviç und das Klima, insbesondere die Eiszeiten	217
2.9	Stufen der Komplexität: Mit Beispielen auf den Punkt gebracht	221
2.9.1	Einzelne Effekte als Beispiel für die Komplexität	222
2.9.2	Rückkopplungen (Feedback-Prozesse) und Komplexität	229
2.9.3	Simulation des Weltklimas als Ganzes	237
<b>3</b>	<b>Ausgewählte Technologische Themen zur Globalen Erwärmung</b>	<b>253</b>
3.1	Das Pareto-Prinzip	254
3.2	Sonnenenergie	256
3.2.1	Photovoltaik	256
3.2.2	EROI (Energetischer Erntefaktor) und EPBT (Energetische Amortisation)	263
3.2.3	Windenergie	265

3.2.4	Der Wirkungsgrad von Physik und Biologie: Warum die Pflanzen nicht maximal arbeiten	267
3.2.5	Der Übergang zur Null-Kohlendioxid-Energiewirtschaft	273
3.2.6	Nachtrag: Die verflixte Kernenergie	278
3.3	Die Dekarbonisierung der Infrastruktur	284
3.3.1	Die Elektromobilität kommt beinahe von selbst	285
3.3.2	Das Problem des Heizens und vor allem des Kühlens (HVAC)	293
3.3.3	Die Herstellung von Zement und Stahl als harter Kern	298
3.3.4	Computer, Bitcoin, Katzen, Licht und Klimawandel	301
3.4	Wälder und Äcker als Kohlenstoff-Senken und Quellen	312
3.4.1	Wälder und Klimawandel, Teil I	312
3.4.2	Ackerböden und Klimawandel.	318
3.5	Grosstechnische Kohlenstoff-Senken (Carbon Capturing)	320
3.5.1	Negative Emissionstechnologien (NETs)	320
3.5.2	Die Endlagerung des Kohlendioxids (Sequestrierung)	329
3.6	Geoengineering-Ideen	337
3.6.1	Wir sind im Anthropozän	338
3.6.2	Erste unerwartete Ankündigung des grossen Problems	339
3.6.3	Beispiele zum Geoengineering: Aerosole in die Stratosphäre	341
3.6.4	Wolkenaufhellung auf dem Meer	344
3.6.5	Meeresdüngung	347
3.6.6	Ein Weltraumschirm	349
3.6.7	Exotisches Geoengineering bleibt Idee, es fehlt Forschung.	352
<b>4</b>	<b>Menschliches und Spekulatives zur Zukunft</b>	<b>357</b>
4.1	Die Ethik des Erwärmens und des Abkühlens der Erde	357
4.2	Die Psychologie des Klimawandels	362

<b>XIV</b>	<b>Inhaltsverzeichnis</b>	
4.3	Das Anthropozän: Anfang und mögliches Ende	376
4.3.1	Die Erde als Planet unter vielen Planeten	376
4.3.2	Eis, Wald, Wolken – es geht nicht so leicht zurück	381
4.3.3	Die Zukunft der Erde	385
	<b>Liste besonderer Wikipedia-Artikel</b>	401
	<b>Zahlen</b>	403
	<b>Glossar</b>	407
	<b>Literatur</b>	411
	<b>Stichwortverzeichnis</b>	421



# 1

## Einleitung und Geschichtliches: Von der Wärmelehre zum Treibhaus Erde

Die Frage der Temperaturen auf der Erde ist eine der wichtigsten und schwierigsten Fragen der Naturphilosophie. Sie setzt sich aus ganz verschiedenen Elementen zusammen, die unter einem allgemeinen Gesichtspunkt betrachtet werden müssen.

Beginn des *Berichts über die Temperaturen der Weltkugel und der planetarischen Räume*,

*Mémoire sur les températures du globe terrestre et des espaces planétaires*,  
Jean-Baptiste Joseph Fourier, 1824 und 1827.

In diesem Teil entwickeln wir die historische Grundlage der Wissenschaft vom globalen Klimawandel.

### 1.1 Der Beginn der Wärmelehre und des Treibhauseffekts

#### 1.1.1 Joseph Fourier und der Glashaus-Effekt

[Für die Frage der Temperatur der Erde] habe ich vor allem vor, die mathematische Theorie der Wärme zu entwickeln.

Jean-Baptiste Joseph Fourier, 1824 und 1827.

Fourier hat recht: Die Temperatur der Erde ist wichtig und ein schwieriges Problem. Der französische Physiker und Mathematiker Joseph Fourier



**Abb. 1.1 Jean-Baptiste Fourier**

Französischer Mathematiker und Vorahner des Treibhauseffekts für die Erde

Bild: Fourier2, Wikipedia Commons, Bunzil.

(1768–1799, Abb. 1.1) versteht unter der Problematik *Temperatur der Erde* auch die Temperatur im Erdinnern (er kann als erster einen Wärmefluss in einem Festkörper berechnen) und unter *planetarischen Räumen* den interstellaren Raum. Als Quellen für die Temperatur der Erde als Ganzem nennt er:

1. Die Strahlen der Sonne, ungleichmässig verteilt und dadurch für das Klima zuständig.
2. Die Erde partizipiert an der Gesamtheit der Strahlung aller Sterne.
3. Die Erde enthält und erzeugt Wärme im Erdinneren.

Heute weiss man, dass das Klimaproblem der Atmosphäre und der Erdoberfläche effektiv nahezu vollständig getrennt ist von den Wärmequellen des Erdinnern. Der Punkt 3, Wärme aus dem Erdinnern als Rest von der Entstehung der Erde durch Kontraktion, ist korrekt. Nennen wir ihn Punkt 3a). Aber wie wir heute wissen, ist es nur *eine* von drei Wärmequellen aus dem Innern der Erde:

- 3 a) Wärmerest durch Kontraktion aus Gravitationsenergie,
- 3 b) Wärme durch Bewegung im flüssigen äusseren Erdkern,
- 3 c) Entstehen von Wärme durch radioaktiven Zerfall.

Natürlich wäre die Vorstellung eines Kerns mit flüssigem Eisen für Fourier undenkbar gewesen; er erwartete in der Erde nur Festkörper. Radioaktivität war vollkommen unbekannt; die Wärmeleistung der vier bekannten



radioaktiven Isotope im Erdinnern, Kalium-40, Uran-235, Uran-238 und Thoriums-232, ergibt zusammen etwa 20 TeraWatt. Insgesamt liefert das Erdinnere eine Wärmeleistung von 47 TeraWatt nach aussen.

Wir wissen heute, dass die Sonne sehr viel mehr Energie zur Erde schickt, nämlich 173 000 TeraWatt, also etwa 3700 Mal mehr als aus dem Erdinneren. Fourier wusste im Prinzip bereits, dass der Energiefluss aus der Tiefe der Erde viel geringer ist als die direkte Einstrahlung – er schloss dies aus der kühlen, konstanten Temperatur in tiefen Kellern.

Für Fourier war Wärme etwas wie Gravitation oder wie ein Fluss, der alles durchströmt – auch das Weltall. Trotz der grossen Anzahl von Sternen ist auch der Energiefluss von den Sternen zur Erde vernachlässigbar gering. Dies ist eine Form der Aussage des Paradoxons von Olbers: Trotz der de facto unendlich grossen Ausdehnung ist der Nachthimmel dunkel. Der gesamte Energiestrom von Sternen entspricht nur wenigen hundert hellen Sternen der Grösse vergleichbar Wega. Der gesamte Energiestrom der kosmischen Hintergrundstrahlung ist grob geschätzt immerhin etwa ein Hundertmillionstel der Sonnenstrahlung. Damit partizipiert die Erde nicht, wie Fourier meint, an der Strahlung des Kosmos. Es gilt sogar das Umgekehrte. Wir werden mit Strahlung ins Weltall Energie los, wie wir (und Fourier) aus der Kälte einer klaren Wüstennacht wissen.

Zurück zu den Arbeiten von Joseph Fourier. Der Schlüssel zu seinem Verständnis von Wärme sind seine Beobachtungen und mathematischen Analysen der Temperatur im Boden. Es geht z. B. um die Weiterleitung von Wärme auf sonnenbeschienenem Boden. Er berechnet und misst die Temperaturen in der Tiefe als Funktion der Zeit, d. h. die Temperaturschwankungen im Boden im Laufe eines Tages oder Jahres. Tiefe ist nicht im Sinn moderner Bohrexperimente zu verstehen. Es geht nur um Meter oder Dutzende von Metern, z. B. schon in tiefen Kellern. Er unterscheidet drei Bereiche: Erstens, die Bodentiefe von wenigen Zentimetern, in der sich die Temperatur messbar im Laufe des Tages ändert, zweitens, die Tiefe von wenigen Metern, in der (überraschenderweise!) nur noch die jährliche Temperaturschwankung zu messen ist, und tiefer (er sagt 40 m), wenn keine zeitlichen Schwankungen mehr festzustellen sind.

Fourier schafft die mathematischen Mittel, um den Abfall der Temperatur-Schwankungen mit zunehmender Tiefe berechnen zu können. Seine Mathematik der Wärmeleitung lässt sich auf eine Kugel übertragen; man kann damit die Abkühlung einer heissen Kugel berechnen. William Thomson, der spätere Lord Kelvin, wird um 1860 mit dieser Formel vergeblich versuchen, das Alter der Erde auszurechnen.

Die Überlegungen Fouriers gehen weiter als nur die Leitung von Wärme in Festkörpern zu berechnen. Zum Geschehen auf der Oberfläche der Erde beschreibt er, wie die Strömungen der Meere und der Atmosphäre die Wärme verteilen.

Joseph Fourier beschreibt als Erster das Prinzip der Erwärmung der Erde und geht damit in die Geschichte der Klimatologie ein. Er nimmt an, dass das Weltall kalt ist (er sagt die planetaren Räume) und von der gleichen Kälte ist wie die Erde an den Polen, *kälter als der Schmelzpunkt des Quecksilbers*. Dann beschreibt er die Ursache, warum es sonst auf der Erde warm ist:

So steigt die Temperatur durch die Wirkung der Atmosphäre, denn die Wärme [der Sonne] findet als Licht weniger Hindernis als zurück, da sie in dunkle Wärme verwandelt wurde.

Jean-Baptiste Joseph Fourier, 1824 und 1827.

Unter *dunkler Wärme* versteht Fourier die Wärme durch infrarote Strahlung. Diese Asymmetrie des Lichtwegs zur Erdoberfläche und zurück ins All ist das Grundprinzip, das (fälschlicherweise oder zumindest nicht vollständig richtig) als Glashaus- oder Treibhauseffekt bezeichnet wird; im Englischen oft Greenhouse Effect. Wir definieren:

Beim *Glashaus-* oder *Treibhauseffekt* wandelt sich Licht beim Auftreffen auf bestimmte Moleküle in Wärmestrahlung um, die in alle Richtungen gestreut wird.

Beim Glashaus wandelt sich das auf Pflanzen und Boden einfallende sichtbare Licht zwar ebenfalls in Wärme um, allerdings verhindert dann das Glas des Glashauses das Entweichen und eine weitere Konvektion. Dies ist beim Glashaus der wesentliche Effekt. Bei der Atmosphäre im Freien wandelt sich das Licht in der Atmosphäre selbst in Wärme um.

Der Begriff des Treibhauseffekts ist also unglücklich gewählt und streng genommen falsch. Aber das Treibhaus hilft, den planetaren Effekt zu verstehen. Fourier hat dies anhand eines einfachen wissenschaftlichen Instruments gelernt, das ein halbes Jahrhundert früher vom Schweizer Naturforscher Horace Bénédict de Saussure (1740–1799) gebaut worden wurde. Aber Fourier hat das Wort *Treibhaus* oder *serre* im Französischen nicht verwendet.

### 1.1.2 Sir Isaac Newton

... der Überschuss an Hitzegrad.. war in geometrischer Progression, während die Zeiten dazu in arithmetischer Progression waren.

Newtons Abkühlungsgesetz in *Scala graduum Caloris*, 1701.

*Grad der Hitze* bedeutet in heutiger Sprechweise Temperatur, *Überschuss an Hitzegrad* bedeutet Temperatur-Differenz.

Der erste Pionier der Wärmelehre, den wir vorstellen, ist wahrscheinlich eine Überraschung: der englische Physiker und Alchemist Isaac Newton, 1642–1722. Newton untersuchte die Wärme insbesondere auch als Leiter der Münze, als Master of the Mint, ab 1699. Es waren sehr praktische Überlegungen, bei weitem nicht im wissenschaftlichen Rang der mechanischen Prinzipien und des Gravitationsgesetzes. Er war sich dessen bewusst – das obige Büchlein hat er anonym veröffentlicht. Seine Beobachtung war, dass die Geschwindigkeit des Abkühlens umso grösser war, je grösser die Differenz der Temperatur des Körpers zur Umwelt war. Allerdings benützte er nicht das Wort Temperatur, sondern sprach vom *Grad der Wärme*. Dieses einfache *Newtonsche Abkühlungsgesetz* beschreibt einen exponentiellen Abfall der Temperatur und kann nützlich sein, aber es ist viel zu simpel angesichts der verschiedenen Teileffekte der Wärmeübertragung. Wir definieren die physikalischen Vorgänge:

- 1) Wärmeleitung überträgt die Energie durch direkten Kontakt,
- 2) Wärmekonvektion durch Transport der warmen Materie selbst,
- 3) Wärmestrahlung ist unsichtbare elektromagnetische Strahlung: je wärmer, desto intensiver und mit umso höherer Frequenz.  
Die Strahlung wird abgegeben oder absorbiert.

Diese Prozesse mussten erst verstanden und auseinander gehalten werden. Newton ahnt die Wärmestrahlung als *Vibrations*, sogar für das Vakuum und spekuliert sogar über einen absoluten Nullpunkt (Rowlands 2018)! Fourier wird für die Wärmeleitung eine elegante mathematische Lösung finden: die Wärmeleitungsgleichung oder Diffusionsgleichung.

Newton ist ein Pionier der Temperaturmessung von alltäglichen Temperaturen bis zu den Temperaturen schmelzender Metalle. Für Temperaturen bis zum schmelzenden Zinn (232°C) verwendet er ein Glaskthermometer mit Leinöl. Seine Eichpunkte sind die Temperatur von schmelzendem Schnee 0°N und die Temperatur des gesunden menschlichen

Körpers definiert zu  $12^{\circ}\text{N}$  („N“ für Grad Newton). Damit ergibt sich der Siedepunkt des Wassers zu etwa  $33^{\circ}\text{N}$ . (Diesen Punkt hatte Newton nicht als Basis genommen, weil er wohl wusste, dass der Siedepunkt des Wassers mit dem Luftdruck schwankt). Die Erweiterung der Skala zu höheren Temperaturen für Metallschmelzen war für Newton als Master of Mint eine praktische Herausforderung. Er benützte dazu einen Eisenbarren, der im Kohlefeuer mit Blasebalg zum Glühen gebracht wurde. Auf diese Stange setzte er kleine Mengen der flüssigen Metalle Blei, Zinn und Wismut und beobachtete, wann sie fest wurden. Mit dieser Methode bestimmte er z. B. für Blei den Schmelzpunkt von  $96^{\circ}\text{N}$ , das glühendste Eisen bei  $192^{\circ}\text{N}$ . Der Schmelzpunkt von Zinn ( $232^{\circ}\text{C}$  oder  $77^{\circ}\text{N}$ ) ist der Verbindungspunkt zwischen den beiden Skalen, von unten das Leinölthermometer, von oben die Zeiten der Schmelzpunkte. Als ein Nebenprodukt der metallurgischen Arbeiten erfindet Newton eine besonders tiefschmelzende Legierung, natürlich *Newtons Metall* genannt.

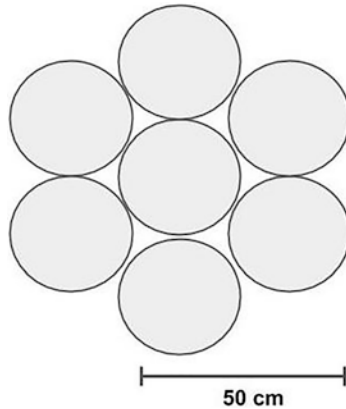
Ein wenig bekannter früher Höhepunkt der Wärmetechnologie (mit antiken Vollbildern), kommt ebenfalls von Newton. Es ist ein Sonnen-Brennofen aus dem Jahr 1704. Newton versteht, dass es darum geht, Strahlen vom Bild der ganzen Sonne zu konzentrieren; die Strahlen sind ja nicht vollständig parallel. Die Hitze steigt mit der *Dichte des Lichts* auf der Brennfläche. *Auf dem Merkur wäre sie sieben Mal grösser als in unserem Sommer wegen des quadratischen Gesetzes des Abfalls der Lichtintensität mit dem Abstand von der Sonne* schreibt Newton in seiner *Opticks*. Das quadratische Abstandsgesetz hatte schon Johannes Kepler gekannt und beschrieben.

Im Newtonschen Brennofen konzentrieren sieben sphärische konkave Spiegel (Abb. 1.2) das Licht auf einen ungefähren Brennfleck. Leider ist kein Exemplar und kein Teil des Spiegelsystems erhalten geblieben, auch die Informationen sind spärlich. Hier einige Zitate aus dem Bericht des schottischen Mathematiker David Gregory (1659–1706) von Newtons Projekt aus dem Jahr 1704 (Simms 1989):

Herrn Newtons sieben Spiegel kann man, da sie einen gemeinsamen Brennpunkt haben, ohne Gefahr zu brennen mit dem Mond bequem einstellen.

Silber widersteht mehr als Gold. Gold kocht ein wenig und macht Blasen, dann fliegen kleine runde Goldkugelchen fort, und Goldhärchen bleiben zurück.

Sir Isaac Newton beabsichtigt 12 weitere Spiegel zu den 7 zu setzen, die es schon gibt, also insgesamt 19.



**Abb. 1.2 Der Newtonsche Sonnenofen**

Ein System von sieben Spiegeln, die das Sonnenlicht auf etwa  $1 \text{ cm}^2$  fokussieren.  
Nach Simms 1989

Der innere Spiegel ist dabei etwas versetzt. Jeder Spiegel hat den Durchmesser 11.5 Zoll oder etwa 30 cm, geschliffen in Glas mit Bleiüberzug. Das System der Spiegel entspricht einer Kugelkalotte mit einer freien Öffnung von 34.5 Zoll (etwa 87 cm) und erzeugt einen Brennfleck in der Brennweite von 22.5 Zoll (knapp 58 cm) Entfernung mit etwa  $\frac{1}{2}$  Zoll oder 1 cm Durchmesser. Rowlands (2018) schätzt, dass die erreichte Energieflussdichte von vermutlich  $460 \text{ W/cm}^2$  (das wäre etwa 7000 Mal mehr als etwa die direkte Energiedichte der Sonnenstrahlung am Boden<sup>1</sup>) erst im Jahr 1945 mit der Atombombe übertroffen wurde, ganz im Sinne des Buchtitels *Heller als 1000 Sonnen* von Robert Jungk.

Noch eine Bemerkung zur Problematik der Begriffe *Wärme* und *Temperatur* im 18. Jahrhundert.

Die Physik der Wärme ist zum Ende des 17. Jahrhunderts und Beginn des 18. Jahrhunderts ein grosses Geheimnis. Wissenschaftliche Aussagen waren selten, die wesentlichen Begriffe wie die Wärme selbst oder auch die Temperatur waren unklar, ja Wärme und Temperatur wurden verwechselt. War die Wärme eine Art durchdringendes Feld wie die Gravitation oder eine Art von materieller Flüssigkeit, die von einem Körper zum anderen strömte? Dies mischte sich mit dem Problem der Chemiker, der Verbrennung. Sie wurde damals vor allem als Befreiung von einem mystischen Stoff

<sup>1</sup> Rowlands nimmt am Boden den halben Wert der Strahlung im Weltraum an, also etwa  $0,065 \text{ W/cm}^2$ . Andere Technologien mit hoher Energiedichte sind Lichtbögen und Laser.

verstanden, dem Phlogiston oder Flammenstoff. Die Phlogistontheorie wurde 1785 durch den französischen Chemiker Antoine Lavoisier widerlegt: Verbrennung ist Verbindung mit Sauerstoff.

Wärme als Stoffmenge in Körpern würde etwas Beständiges bedeuten. Dass dies falsch ist, beweist der britische Offizier und Physiker Sir Benjamin Thompson oder Graf Rumford. Er hatte 1798 als Kriegsminister in München am Hof des bayrischen Kurfürsten die Kanonengiesserei besucht. Hier wurden die Seelen der Kanonen aus Bronze mühsam aufgebohrt, begleitet von einer nicht aufhörenden Wärmeentwicklung. Wärme konnte endlos erzeugt werden, sie konnte kein Stoff sein.

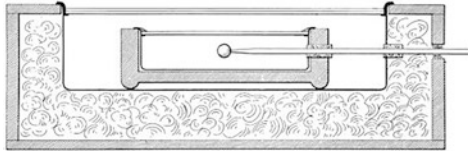
Der Temperaturbegriff ist bisher über die Ausdehnung von Stoffen definiert, z. B. von Leinöl, Alkohol oder Quecksilber oder vielleicht Wasser. Dazu kommen zwei willkürliche, möglichst bequem erreichbare Fixpunkte zur Eichung, etwa eine bestimmte Kälte, die Körperwärme oder der Siedepunkt des Wassers. Wasser selbst ist sichtlich ungeeignet als Thermometerflüssigkeit und zeigt die Problematik der Temperaturdefinition über einen materiellen Stoff: Unterhalb von  $4^{\circ}\text{C}$  wäre jeder Punkt zweideutig, da Wasser bei  $4^{\circ}\text{C}$  die maximale Dichte hat und sich deshalb beim Abkühlen nicht linear zusammenzieht. Der österreichische Physiker Ernst Mach liefert dazu in seinem Lehrbuch eine klassische, brillante Diskussion (Mach, 1896). Es ist auch unsinnig zu sagen *der Wärmegrad von A ist drei Mal der von B* – es sind nur Zahlen.

Schwächer wird die Stoffabhängigkeit, wenn die Ausdehnung (oder der Druck) von Gasen gemessen wird. Und es gibt einen absoluten Bezugspunkt: Die Abkühlung, bei der mit linearer Extrapolation das Volumen mathematisch verschwindet. Der französische Physiker Guillaume Amontons hat bereits 1699 diese Idee gehabt, erst 1848 hat Lord Kelvin dann die absolute Temperaturskala eingeführt. Heute ist die Temperaturskala über die Energie definiert, über den Wert der sog. Boltzmann-Konstante – und zwar so, dass die alte Celsius-Skala recht genau weiter gilt. Diese Temperaturen haben jetzt physikalische Bedeutung und können multipliziert werden!

### 1.1.3 Horace-Bénédict de Saussure

Sie [die dunkle Wärme] kann wegen der Glasscheibe das Gefäß nicht verlassen, sammelt sich in einem Raum an, der von isolierender Materie umgeben ist, und die Temperatur steigt bis die hereinströmende Wärme gerade von der fortströmenden kompensiert wird.

Jean-Baptiste Joseph Fourier, 1824 und 1827.



**Abb. 1.3 Die Boîte chaude**

Die *heisse Box* nach Horace de Saussures

Bild: Nachbau des Astrophysikers Samuel Langley, um 1887.

Quelle: Nicht bestimmbar.



**Abb. 1.4 Schweizer Banknote zu Ehren von de Saussure**

Quelle: eigen

De Saussure, 1740–1799, hatte sich ein Miniaturglashaus in der Box gebaut (Abb. 1.3). Er wollte feststellen, ob die Sonneneinstrahlung mit zunehmender Höhe abnehme. Es war ja offensichtlich, dass die Temperatur mit der Höhe abnahm. Der handliche Apparat enthält mehrere Glasscheiben (bis zu fünf), eine isolierende Wand und eine dunkle Auskleidung. Ein eingesetztes Thermometer misst die Innentemperatur. Es wird heiss, in heutigem Mass bis zu 110°C! De Saussure hat sozusagen mit seiner *Boîte chaude*, der heißen Box (Abb. 1.3) den ersten Solarofen konstruiert. Die erreichte Innentemperatur bleibt auch in der kalten Höhe gleich. Das Experiment ist ein wissenschaftlicher Erfolg. Der Strom der Wärme von der Sonne zur Erde ist konstant, d. h. hier unabhängig von der Höhe.

Die Abb. 1.4 zeigt eine Schweizer Banknote mit seinem Bild; er wird als Alpenforscher geehrt. Er ist Botaniker, Geologe, Glaziologe und Geometer, insbesondere hat er das Matterhorn vermessen.

Ein kleines, originelles Messinstrument stammt von ihm, das Cyanometer (von griechisch *kyanos blau*). Es besteht aus einem Farbkranz mit Blau-, Hellgrau- und Dunkelgrautönen bis zu Schwarz, um damit den Farbton des Himmels zu bestimmen. Alexander von Humboldt hatte auf seiner Amerikareise von 1799–1804 ein derartiges Instrument mitgeführt.

### 1.1.4 Friedrich Wilhelm Herschel und das Infrarote

So setzt sich das Sonnenlicht am Boden zusammen, wenn die Sonne im Zenit steht, jeweils auf den Quadratmeter bezogen: 527 W infrarote Strahlen, 445 W sichtbares Licht und 32 W ultraviolette Strahlung. Die Bilanz zwischen absorbiertes und ausgesandter infraroter Strahlung ist für das Klima der Erde kritisch.

Institute of Agriculture, University of Tennessee. 2020.

Wärmestrahlung ist schon immer gefühlt worden und damit bekannt gewesen. Es gab sogar bis zu Beginn des 19. Jahrhunderts die Vorstellung von physikalischen *Kältestrahlen*. Einer der letzten Verfechter war der schon erwähnte Sir Benjamin Thompson, Graf Rumford, der britische Physiker und Offizier. Aber es gibt keine Kältestrahlen, nur Wärmestrahlen (oder einen Mangel an Wärmestrahlung). Der klare physikalische Beweis für die Existenz von Wärmestrahlen, zusätzlich zum sichtbaren Licht, war ein einfaches Experiment des deutsch-britischen Astronomen (und Musikers) Friedrich Wilhelm Herschel (1738–1822). Herschel sucht für Sonnenbeobachtungen nach dem idealen Filter für das Teleskop, um die Sonne sicher beobachten zu können. Das Problem ist, dass das Filter das Licht nur dämpfen soll, aber die zerstörerische Wärme ganz abhalten. Er hätte gerne ein Filter für das sichtbare Licht einerseits und ein Filter für die Wärme andererseits.

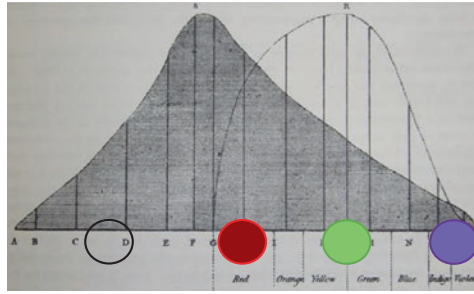
Im Jahr 1800 macht Herschel dafür Versuche mit einem Prisma, das das Sonnenlicht in das sichtbare Spektrum zerlegt, und misst dabei mit einem geschwärzten Thermometer auch die auftretende Wärme. Die Intensität des sichtbaren Lichts misst Herschel mit einem originellen Verfahren. Er verwendet ein Mikroskop und betrachtet im jeweiligen Licht die noch sichtbaren Einzelheiten an einem Objekt (einem rostigen Nagel). Zu seiner Überraschung findet er zwar für das sichtbare Licht ein Maximum und für die unsichtbare Wärme ein anderes Maximum – aber ausserhalb des sichtbaren Spektrums, jenseits des roten Lichts (Abb. 1.5).

Die graue Fläche (links) zeigt die gemessene Wärme, die rechte Kurve die empfundene Lichtstärke. Je weiter rechts im Diagramm, umso stärker ist die Brechung.

Er schreibt:

„Beim Punkt R, wo wir das meiste Licht haben, gibt es nur wenig Wärme, beim Punkt S, wo wir die meiste Wärme haben, finden wir überhaupt kein Licht.“





**Abb. 1.5 Die Spektren von Friedrich Herschel**

Links (grau) seine Wärmemessung, rechte Kurve die Lichtmessung

Bild: Herschel, 1800 Phil. Trans. Royal Soc. London, Vol. 90, S. 530

Herschel hatte damit die Existenz der infraroten Strahlung bewiesen. Er weiss natürlich nichts von den verborgenen Schwierigkeiten seines Experiments, z. B. von der Abhängigkeit von Tages- oder Jahreszeit, von der ungleichmässigen Dispersion des Prismas, die die Energiedichten pro Länge verzerrt, oder von der Empfindlichkeitskurve des Auges, die ebenfalls ihr Maximum bei Grün (ca. 500 nm Wellenlänge) ganz in der Nähe des Maximums der Kurve (hellgrün, 550 nm) hat. Wenn die Sonne gleichmässig über alle Farben Licht aussenden würde, wäre seine gemessene Lichtkurve trotzdem so gewesen. Das Auge würde von allein durch seine spektrale Empfindlichkeit eine ähnliche Kurve ergeben.

Herschel zeichnet beide Spektren auf die gleiche Achse und hält sie *aus philosophischen Gründen*, im Sinne des Rasierers von Ockham, für zwei Aspekte der gleichen Ursache:

„... ob das Licht wesentlich verschieden ist von den Wärmestrahlen? Ich würde als Antwort vorschlagen, dass es uns nicht gestattet ist, zwei Ursachen vorzuschlagen, wenn schon eine Ursache ausreicht.“

Aber Licht (und der Sensor Auge) und Wärme (über die Haut) sind für seine Zeitgenossen doch zu verschiedene Welten, um zusammen zu gehören. Leider gibt er der falschen Kritik nach und schreibt abschliessend:

„Es scheint nicht so zu sein, dass die Natur ein und denselben Mechanismus für zwei unserer Sinne verwendet ...“.

Dabei hatte er sogar festgestellt, dass Linsen für beides, für Licht und für Wärme (die *chaleur obscure* damals oder infrarotes Licht heute) ähnliche

Wirkung haben, nämlich Strahlen *zu verdichten*. Beide Strahlenbereiche sind elektromagnetische Strahlen mit gleicher Ausbreitungsgeschwindigkeit, der Lichtgeschwindigkeit. Es sind nur kleine Ausschnitte aus dem riesigen Gesamtspektrum von Strahlung über 25 Potenzen in Wellenlänge bzw. Frequenz. Die Gemeinsamkeit wird dann James Maxwell 1864 erkennen. Er wird bemerken, dass die Berechnung der Geschwindigkeit der (damals hypothetischen) elektromagnetischen Wellen zufällig oder wie durch Zauberei die Geschwindigkeit von Licht ergibt ...

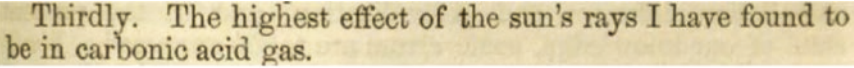
### 1.1.5 Eunice Newton Foote und John Tyndall

Drittens. Den grössten Effekt auf die Sonnenstrahlen habe ich bei Kohlensäuregas gefunden.

Eine Atmosphäre aus diesem Gas würde unserer Erde eine hohe Temperatur geben; und wenn, wie manche vermuten, die Erdatmosphäre in einer Periode mehr als heute enthalten hätte, dann wäre daraus eine höhere Temperatur entstanden, sowohl durch die eigene Aktion wie durch die höhere Dichte.

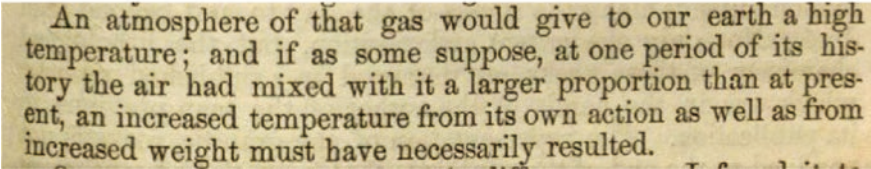
Eunice Newton Foote (1819–1888) war eine amerikanische (Amateur-) Wissenschaftlerin und Erfinderin und die erste Person, die mit Experimenten die *Glashaus-Eigenschaft* von Kohlendioxid zeigte, drei Jahre bevor der viel berühmtere irische Physiker John Tyndall ähnliche Versuche professionell durchführte und feststellte: Kohlendioxid absorbiert Sonnenlicht und verwandelt es effizient in Wärme (s. die Textausschnitte der Abbn. 1.6). Tyndall hatte die Arbeit von Foote nicht gekannt. Die Vereinigten Staaten waren damals Europa auch noch nicht wissenschaftlich ebenbürtig; der Wissenschaftsbetrieb war erst im Aufbau. Dazu war Eunice Foote eine Frau, die deshalb nicht einmal ihre Arbeit selbst vortragen durfte (der Vortragende war allerdings der damals wohl berühmteste amerikanische Physiker Joseph Henry), und diese Versuche waren nahezu ihre einzigen physikalischen Arbeiten. In ihren Experimenten liess sie Sonnenlicht auf dicht verschlossene Glasröhren mit verschiedenen Gasen fallen.

Als Nachtrag zum Vortrag von Eunice Foote: Sie führt Kohlendioxid (Kohlensäure) als den dritten Punkt in ihrer Liste auf, ihr erster Punkt ist die Dichte der Luft. Foote verfügt über eine Luftpumpe. Bei verdünnter Luft ist die Erwärmung geringer, bei erhöhten Luftdruck höher. Der zweite Punkt ist der Wassergehalt der Luft. In mit Wasserdampf gesättigter Luft ist die Erwärmung höher als in scharf getrockneter Luft. Aber beim Versuch mit der dritten Option, dem  $\text{CO}_2$  im Glaszylinder, war der Effekt am stärksten



Thirdly. The highest effect of the sun's rays I have found to be in carbonic acid gas.

Drittens. Den grössten Effekt auf die Sonnenstrahlen habe ich bei Kohlensäuregas gefunden.



An atmosphere of that gas would give to our earth a high temperature; and if as some suppose, at one period of its history the air had mixed with it a larger proportion than at present, an increased temperature from its own action as well as from increased weight must have necessarily resulted.

Eine Atmosphäre aus diesem Gas würde unserer Erde eine hohe Temperatur geben; und wenn, wie manche vermuten, die Erdatmosphäre in einer Periode mehr als heute enthalten hätte, dann wäre daraus eine höhere Temperatur entstanden, sowohl durch die eigene Aktion wie durch die höhere Dichte.

**Abb. 1.6 Aus: Die Umstände, die die Wärme der Sonnenstrahlen betreffen**

Eunice Foote, vorgetragen vor der American Association for the Advancement of Science, 23. August 1856. Am. Journal of Science and Arts, Vol. 22, S. 382–383

und es wurde sogar der Glasbehälter des Experiments heiss. Die kaum bekannte Eunice Foote hat mit  $\text{CO}_2$  und Wasserdampf die ersten wissenschaftlichen Versuche zur Treibhaus-Problematik gemacht.

Der irische Physiker John Tyndall (1820–1893) ist nicht nur berühmt als Physiker, sondern auch als Alpenfreund und Bergsteiger. Der leicht beobachtbare Effekt der Lichtstreuung an kleinen Teilchen, die ungefähr so gross sind wie die Lichtwellenlänge, heisst nach ihm *Tyndall-Effekt*. Es ist in der Wissenschaft ja wohlbekannt, dass ein Effekt oder eine Konstante, die mit einem Namen verbunden ist, beide populärer macht – den Namens-träger wie den Effekt<sup>2</sup>. Zum Tyndall-Effekt gibt es viele alltägliche Beispiele, etwa sichtbare Staubteilchen im Sonnenlicht oder durch Leim oder ähnliche *Kolloide* getrübbtes Wasser oder Zigarettenrauch in der Luft. Verwandt ist auch die Erscheinung der *Gottesfinger*, sichtbar gewordene Strahlen von Licht in feuchter Luft. In der Abb. 3.6 macht der Tyndall-Effekt bei einem Sonnenkraftwerk die intensiven Lichtstrahlen selbst am Tag deutlich.

Ein ganz anderer Bereich führt Tyndall zur Klimaforschung, nämlich seine Leidenschaft für die Alpen, sowohl als Tourist und Bergsteiger wie auch als Wissenschaftler. Es war um 1860 das *Goldene Zeitalter des Alpinismus*. John Tyndall bestieg als Erster zwar nicht das Matterhorn

<sup>2</sup>Üblicherweise heisst eine solche Bezeichnung ein Eponym, nach altgriechisch *eponymos* namensgebend.



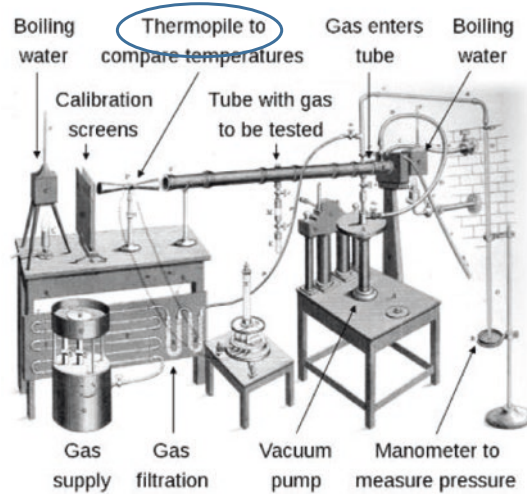
**Abb. 1.7 The Mer de Glace (Das Eismeer)**

Stich im Buch *The glaciers of the Alps* (Die Gletscher der Alpen) von John Tyndall, 1896, Longmans, Green, and Co, London, 1861. 2. Auflage.

Bild: Tyndall 1896 The Mer de Glace-MJ, Wikimedia Commons, John Tyndall

(4478 m) selbst, aber den Nebengipfel auf der Westschulter (4241 m), der nach ihm jetzt Pic Tyndall heisst (mehrere Berge auf der Erde tragen heute seinen Namen). Tyndall war auch als Wissenschaftler in den Alpen, mass Temperaturen und Luftdruck und beobachtete Gletscher. Seine diesbezüglichen Bücher sind historische Schmuckstücke (Abb. 1.7). Über die Gletscherforschung stiess er auf den Gedanken von Fourier von der Asymmetrie in der Durchlässigkeit der Atmosphäre für sichtbares und unsichtbares Licht und auf die heisse Box des Bergsteiger-Kollegen de Saussure.

Ohne von Eunice Foote zu wissen, beginnt er mit Experimenten zur Absorption von unsichtbarem Licht. Dazu baut er eine professionelle und empfindliche, ja raffinierte Apparatur (Abb. 1.8) zum Messen des Absorptionsverhaltens von Gasen. Lichtquellen sind zwei Behälter mit siedendem Wasser mit ihrer Wärmestrahlung. Damit misst er nur (langwellige) Wärmestrahlung und nicht Sonnenstrahlung und Wärmestrahlung zusammen. Das mit dem Thermoelement verbundene Galvanometer sei so empfindlich gewesen, dass es die Wärme eines Gesichts gespürt habe und deshalb aus der Entfernung, mit einem Teleskop quer durch den Raum, abgelesen werden musste.



**Abb. 1.8 Die Messapparatur von Tyndall**

Das Thermoelement (*Thermopile*) misst Unterschiede der Strahlung von den beiden Seiten mit einem Galvanometer (Schemel in der Mitte). John Tyndall, 1861.

Bild: Tyndalls setup, Wikimedia Commons, John Tyndall, subsequently annotated.

Er verglich die Absorption der einfachen Gase wie Sauerstoff, Wasserstoff und Stickstoff (die er für einatomige Moleküle hielt) mit der von komplizierteren Gasen wie Wasserdampf, Kohlendioxid, Kohlenwasserstoffen wie Methan und Ozon und fand gewaltige Unterschiede. Die komplexen Gase absorbieren (und strahlen wieder ab) tausend Mal mehr als trockene,  $\text{CO}_2$ -freie Luft: Wasserdampf ( $\text{H}_2\text{O}$ ) etwa 70 Mal, Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ ) nahezu 1000 Mal, Stickstoffdioxid ( $\text{NO}_2$ ) 1600 Mal und Ammoniak ( $\text{NH}_3$ ) sogar 5500 Mal mehr (Tyndall nach Arthur Smith 1920).

Ausser dem leicht braunroten  $\text{NO}_2$  sind all diese Gase wie Luft für das Auge perfekt farblos und unsichtbar, aber für die infrarote Strahlung sind die komplexen Gase undurchsichtig. Tyndall zieht daraus den Schluss, dass ohne Wasserdampf (und wir fügen hinzu, ohne Kohlendioxid) in der Luft, *der Frost die Erde fest im Griff hätte*.

Er schreibt:

Wenn die Wärme von einem Planeten absorbiert wird, so ändert sich ihre Qualität. Die Strahlen, die dann vom Planeten ausgehen, können nicht mit derselben Freiheit zurück ins All. So erlaubt die Atmosphäre den Eintritt der Wärme der Sonne, aber kontrolliert ihren Austritt. Das Ergebnis ist die Tendenz, dass sich Wärme auf der Oberfläche des Planeten ansammelt.

Tyndall versteht auch, dass Tau und Frost durch Abstrahlung von Wärme erfolgen. London ist für ihn eine Wärmeinsel – auch wir wissen heute, dass Städte wärmer sind als das Umland. Er macht weitere Entdeckungen zur Absorption und Ausstrahlung von Wärme oder Licht, etwa den erwähnten Tyndall-Effekt. Dies ist die Sichtbarkeit der Lichtstreuung von Partikeln in einem durchsichtigen Medium, Gas oder Flüssigkeit; man kann den Strahl des eingestrahnten Lichts von der Seite sehen. Die Streuung von elektromagnetischen Wellen (wie z. B. Licht) an Teilchen enthält viele Phänomene, da ja sowohl die Wellenlänge der Strahlung wie die Teilchengrösse sehr variieren können.

John Tyndall hatte von seinem befreundeten Kollegen, dem englischen Physiker Michael Faraday (1791–1867), im Jahre 1857 gelernt, dass feinverteiltes kolloidales Gold, das in einer Flüssigkeit schwebt, das Licht streut und als Trübung zu sehen ist. Tyndall untersuchte den Vorgang dieser Lichtstreuung von Partikeln allgemein; er stiess auch auf dieses Problem bei der Reinigung von Gasen für seine Experimente. Teilchen im Gas, genannt Aerosole, stören den Wärmehaushalt; wir kommen später darauf zurück. Tyndall baut ein Messgerät und verwendet es 1871, um die Londoner Luftverschmutzung nachzuweisen und zu messen. Allgemein wird das kurzwellige, blaue Licht stärker gestreut und das rote Licht bleibt auf der geradlinigen Richtung übrig. Ein besonders hübsches Beispiel dieser Physik ist der trübe Stein in der Abb. 1.9. Die milchige Farbe entsteht durch Streuung an Myriaden von Kryolith-Teilchen. Der Glasbrocken erscheint bläulich, das eher transiente Licht hat orange Farbe. Erst bei grösseren Teilchen, z. B. den Wassertropfen einer Wolke, wird die Streuung unabhängig von der Lichtfrequenz – die Wolken sind weiss oder grau.

Tyndall ist nicht nur in der Physik seiner Zeit in vielen Bereichen aktiv (Akustik, Magnetismus, Licht und Wärme, Aerosole), sondern wendet seine Erkenntnisse an und ist vielseitiger Erfinder. In gewissem Sinn ist er Begründer der angewandten Wissenschaft der Aerosole.

**Ein *Aerosol* (ein Kunstwort aus altgriech. *αἴρ*, deutsch ‚Luft‘, und lateinisch *solutio*, Lösung) ist eine Dispersion von flüssigen oder festen Schwebeteilchen in einem Gas.**

Aus seinen Erfahrungen mit Luft und Gasen entstehen u. a.

- ein Gerät zur Bestimmung der Konzentration von Partikeln in Luft oder Flüssigkeiten, das Nephelometer (vom griechischen Wort für Wolke, *nephos*),