

Stephan Buhofer

# Treibhausgasemissionen verstehen

Der Klimawandel im Kontext von  
Wissenschaft und Politik



# Inhalt

Vorwort	7
<b>1 Einführung und Übersicht</b>	<b>9</b>
1.1 Treibhausgase und der Treibhauseffekt	9
1.2 Die Wirkung von Treibhausgasen	11
1.3 Auswirkungen auf die Temperatur	13
1.4 Emissionen: Messung und Analyse	15
<b>2 Naturwissenschaftliche Grundlagen</b>	<b>19</b>
2.1 Die Physik der Sonnenstrahlung	19
2.2 Wechselwirkungen zwischen Strahlung und Materie	20
2.3 Wechselwirkungen in der Atmosphäre und der Treibhauseffekt	22
2.4 Das Strahlungsgleichgewicht der Erde	25
2.5 Klimaantriebe und Rückkopplungen	28
2.6 Die Verweilzeit	31
2.7 Strahlungsantrieb, Kohlendioxid-Äquivalente, Treibhauspotenzial	32
2.8 Temperaturänderung: die Klimasensitivität	39
2.9 Historisches	44
<b>3 Konzentration</b>	<b>45</b>
3.1 Einführung	45
3.2 Die Verweilzeit	46
3.3 Die Konzentration von Treibhausgasen und Aerosolen	48
3.4 Der Strahlungsantrieb	51
3.5 Kohlendioxid-Äquivalente	54
<b>4 Der Kohlenstoffkreislauf und die erdgeschichtliche Perspektive</b>	<b>56</b>
4.1 Der Kohlenstoffkreislauf	56
4.2 Klimatische Verhältnisse in der erdgeschichtlichen Vergangenheit	61

<b>5 Emissionen</b>	<b>66</b>
5.1 Einführung	66
5.2 Treibhausgasemissionen	67
5.3 Bevölkerungswachstum, Wirtschaftswachstum, Emissionsintensität	75
5.4 Produktions- und Konsumperspektive	85
5.5 Quellen der Emissionen	90
5.6 Landnutzungsänderungen	95
5.7 Der Flug- und Schiffsverkehr	101
5.8 Individuelle Emissionen	106
5.9 Energieverbrauch	115
<b>6 Temperatur</b>	<b>120</b>
6.1 Entwicklung der Temperatur	120
6.2 Konzentration und Temperatur	122
6.3 Emissionen und Temperatur, das Kohlenstoffbudget	125
6.4 Weitere Auswirkungen des Klimawandels	128
<b>7 Die internationale Klimapolitik</b>	<b>133</b>
7.1 Das Ziel von 1,5 und 2 Grad Celsius	133
7.2 Das Rahmenübereinkommen über Klimaänderungen	136
7.3 Das Kyoto-Protokoll	138
7.4 Exkurs: Emissionsrechtehandel und Emissionsreduktion im Ausland	142
7.5 Der erste Verpflichtungszeitraum unter dem Kyoto-Protokoll 2008–2012	144
7.6 Der zweite Verpflichtungszeitraum unter dem Kyoto-Protokoll 2013–2020	150
7.7 Das Übereinkommen von Paris	152
<b>8 Epilog: Klimaschutz zwischen technischer und mentaler Transformation</b>	<b>157</b>
Literaturverzeichnis	173
Über den Autor	182

# Vorwort

Dies ist ein Fachbuch für die Allgemeinheit. Es entspringt der Überzeugung, dass jeder Mensch ein technisches Grundwissen über den Klimawandel brauchen und selbst ein guter Klimaschützer sein kann.

Der Bedrohung der Erderwärmung gegenüber steht das immense Wissen, welches die Menschheit darüber besitzt. Die Emissionen von Treibhausgasen und die daraus resultierende Konzentration in der Atmosphäre, der bisherige Temperaturanstieg, die Bandbreite der zukünftigen Auswirkungen unter verschiedenen Szenarien, all dies ist bekannt. Doch mit diesen Zusammenhängen setzen sich vor allem Experten in der Wissenschaft und in den öffentlichen Verwaltungen auseinander. Obwohl viel gute Erklärungsarbeit geleistet wird, ist der Graben zwischen den Spezialisten und der breiten Öffentlichkeit groß. Dieser Umstand ist zum Teil auf die Komplexität der Dinge zurückzuführen. Es herrscht aber auch die Ansicht vor, dass die Emissionsreduktion Sache des Staates ist und die Bürger sich über den demokratischen Prozess daran beteiligen können. Ein mangelndes Verständnis der Betroffenen behindert jedoch deren Mitsprache in der politischen Diskussion und schmälert das Bewusstsein der persönlichen Verantwortung der einzelnen Verursacher. Letztere haben einen großen Spielraum, Treibhausgasemissionen im eigenen Handlungsbereich sofort zu reduzieren. Und sie stehen auch am anderen Ende der Kausalkette, als Leidtragende des Klimawandels oder Begünstigte von dessen Abschwächung. Es überrascht daher, wie wenig Beachtung der Rolle des Individuums geschenkt wird. Jeder von uns hat die Wahl, Teil der Lösung oder Teil des Problems zu sein. Um sich für Ersteres zu entscheiden, braucht es vor allem eine eigene Überzeugung.

Ein gutes Verständnis der Zusammenhänge rund um das Phänomen des Klimawandels ist die Voraussetzung für ein solches Verantwortungsbewusstsein und die richtige Einschätzung eigener Verhaltensweisen. Auch für die öffentliche Debatte und politische Entscheide braucht es einigermaßen klare Verhältnisse. Dieses Buch ist bestrebt, zwischen Experten und Laien zu vermitteln und die Lücke weiter zu schließen, welche zwischen Wissensstand und Handeln herrscht. Es soll im Nachhinein nicht heißen, man habe nichts gewusst. Obwohl das einfacher wäre. Denn Wissen ist auch eine Aufforderung zum Handeln.

Das Buch umspannt verschiedene Disziplinen. Eigenes Wissen brachte ich ursprünglich vor allem im Bereich der internationalen Klimapolitik und der Treibhausgasemissionen mit. Voraussetzung für ein gutes Verständnis der Emissionszahlen sind jedoch Kenntnisse in der Klimawissenschaft. Gleichzeitig Vorteil und Herausforderung war, dass ich als Nichtnaturwissenschaftler von Außen an diese Materie herantrat. Das erlaubt eine Schilderung, welche der Laienperspektive nahesteht. Es bedingt aber auch große Sorgfalt bei der Ausfertigung. Die angewandte wissenschaftliche Arbeitsmethode, welche auf Originalquellen oder anderer Fachliteratur basiert, soll die dahingehende Zuverlässigkeit sicherstellen. Das äußert sich, neben einem nüchternen Stil, in den vielen Quellenhinweisen, insbesondere auf die Berichte des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderungen (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC). Objektivität war oberstes Gebot.

Der Text ist eine Weiterentwicklung des erstmals 2017 erschienenen Vorläufers »Der Klimawandel und die internationale Klimapolitik in Zahlen«. Neben vielen Neuerungen im Text und am Konzept wurden, wo es möglich war, auch die Zahlen auf den neusten Stand gebracht. Ein neuer IPCC-Sachstandsbericht ist seit 2013/2014 nicht erschienen und wird in den Jahren 2021/2022 erwartet. Quellhinweise beziehen sich daher auf den Bericht von 2013/2014, betreffen jedoch meist grundlegende Angaben, welche in der Regel keinen radikalen Änderungen unterworfen sind. Die Zahlen sollen hier vor allem verständlich gemacht werden, die neusten Daten können oft in den jeweils angegebenen Quellen eingesehen werden.

Zahlreiche Menschen haben mit ihrem Wissen zu diesem Buch beigetragen. Wissenschaftler, Arbeitskollegen bei der Klimarahmenkonvention und Fachleute in Verwaltungen oder gemeinnützigen Organisationen haben sich viel Zeit genommen, um meine Fragen zu beantworten, Informationen beizusteuern und Textstellen zu überprüfen. Ihnen allen sei hier gedankt. Ohne sie wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen. Namentlich danke ich Prof. em. Craig F. Bohren, Prof. Thomas Stocker, Prof. Reto Knutti und Dr. Urs Neu für die Unterstützung im Bereich der Physik und der Klimawissenschaft. Für allfällige verbleibende Irrtümer oder Fehler bleibe ich allein verantwortlich. Um Hinweis auf solche wäre ich dankbar.

Meine Korrespondenzadresse ist auf Anfrage beim Verlag erhältlich.

Stephan Buhofer

# 1 Einführung und Übersicht<sup>1</sup>

Dieses Buch enthält einen Überblick über verschiedene Fachbereiche und zeigt Zusammenhänge zwischen ihnen auf. Es soll das Verständnis des Klimawandels, seiner Ursachen und der staatlichen Maßnahmen als Ganzes ermöglichen. Die Leser werden durch Gebiete geführt, mit welchen sich normalerweise nur Spezialisten aus Wissenschaft und Politik beschäftigen und die für Außenstehende ungewohnt sind. Um den Einstieg zu erleichtern, beginnt der Text in diesem **1. Kapitel** anschließend mit einer Übersicht, in welcher die wichtigsten im Buch beschriebenen Konzepte vorgestellt werden. Es folgen im **2. Kapitel** die **naturwissenschaftlichen Grundlagen** aus der Physik und Klimawissenschaft, welche das Phänomen des Klimawandels erklären und die Basis für das theoretische Verständnis der konkreten Zahlen in den nachfolgenden Kapiteln bilden. Leser, welche diese technischen und teilweise komplexen Erläuterungen nicht bis in alle Einzelheiten nachvollziehen wollen, können sich auf die Übersicht im 1. Kapitel beschränken. Die **Konzentration** von Treibhausgasen in der Atmosphäre wird im **3. Kapitel** untersucht. Das **4. Kapitel** ist ein erdwissenschaftlicher Exkurs, in dem der **Kohlenstoffkreislauf** und die klimatische Situation, welche in der **erdgeschichtlichen Vergangenheit** herrschte, beschrieben wird. Die erwähnte Konzentration von Treibhausgasen in der Atmosphäre hat ihre Ursache in den **Emissionen** auf der Erde, Gegenstand des **5. Kapitels** und ein Schwerpunkt dieses Buches. Das **6. Kapitel** widmet sich den Auswirkungen der Entwicklung auf die **Temperatur**. Die Bestrebungen, welche bisher durch die **internationale Klimapolitik** unternommen worden sind, und deren Ergebnisse sind im **7. Kapitel** aufgeführt. Im **Epilog**, und nur dort, fließen ein paar persönliche Überlegungen in einer mehr philosophischen Betrachtungsweise der Situation ein.

## 1.1 Treibhausgase und der Treibhauseffekt

Unsere Atmosphäre enthält klimawirksame Gase, welche die Temperatur auf der Erde erhöhen, indem sie die wärmende Wirkung der Sonnenstrahlung verstärken. Diese sogenannten **Treibhausgase** lassen die von der Sonne ankommende Strahlung passieren, nehmen jedoch die in der Folge von der Erdoberfläche abge-

---

<sup>1</sup> Siehe für Quellenhinweise der in diesem Teil gemachten Angaben die nachfolgenden, alle Einzelheiten enthaltenden Kapitel.

strahlte Wärme auf und geben einen Teil davon zurück auf die Erde ab. Das Phänomen wird **Treibhauseffekt** genannt. (Kapitel 2.3) Erst diese neben der Sonne existierende zusätzliche Wärmequelle führt zu Temperaturen auf dem Planeten, welche in einem für die Entwicklung von Lebewesen günstigen Bereich liegen.

Die Treibhausgase sind ein natürlicher Bestandteil der Atmosphäre, können aber auch durch menschliche Aktivitäten freigesetzt werden, was deren Menge und somit die Strahlung erhöht. Der **anthropogene Treibhauseffekt** bezeichnet die Wirkung aller durch die Menschen verursachten Treibhausgase. Diesen Effekt messen wir, um den menschlichen Einfluss auf das Klima zu quantifizieren.

Es gibt **sechs Arten von Treibhausgasen**. Vier werden durch den Menschen direkt erzeugt, wobei drei davon auch natürlich auftreten: **Kohlendioxid**, **Methan** und **Distickstoffmonoxid** (Lachgas). Die vierte ist die Gruppe der **halogenierten Gase**, welche in erster Linie künstlich durch den Menschen produziert werden. Zwei weitere, natürlich auftretende Gase werden indirekt durch den Menschen beeinflusst: **Wasserdampf**, das anteilmäßig für den Treibhauseffekt wichtigste Gas, und **Ozon**. (Kapitel 3.3, 3.4)

Treibhausgase befinden sich in natürlichen Kreisläufen zwischen der Atmosphäre, den Meeren und dem Land oder werden durch chemische Reaktionen erzeugt und abgebaut. (Kapitel 2.6, 4.1) Grundsätzlich besteht ein gewisses Gleichgewicht in diesem System. Die Konzentration der Treibhausgase in der Atmosphäre kann durch natürliche äußere Einflüsse wie zum Beispiel eine Veränderung in der Sonneneinstrahlung zu- oder abnehmen. Dies erfolgt aber meist (abgesehen von Ausnahmen durch plötzliche Ereignisse wie Vulkanausbrüche) nur sehr langsam und innerhalb einer gewissen Bandbreite. Mit der Industrialisierung um 1750 und den damit verbundenen Emissionen von Treibhausgasen hat deren atmosphärische Konzentration jedoch in kurzer Zeit stark zugenommen. Insbesondere die Nutzung fossiler Energieträger hat große Mengen von Kohlendioxid, welches in Form von Kohlenstoff während Hunderten von Millionen Jahren im Boden abgelagert wurde, innerhalb weniger Jahrhunderte in die Atmosphäre freigesetzt. Dies führte zu einer erhöhten Strahlung auf die Erde.

Die **Strahlung** von der Sonne und aus der Atmosphäre und die **Temperatur** auf der Erde stehen in einem festen, physikalisch bedingten **Verhältnis** zueinander. Wird die Strahlung erhöht, reagiert das System Erde mit einer entsprechenden Temperaturerhöhung, bis das Gleichgewicht zwischen einfallender Strahlung und Temperatur wieder hergestellt ist. In solch einem Prozess befinden wir uns momentan. (Kapitel 2.4)

## 1.2 Die Wirkung von Treibhausgasen

Die Wirkung von Treibhausgasen hängt von deren Stärke, der Konzentration in der Atmosphäre und der Verweilzeit ab.

Die **Verweilzeit** ist die Zeitspanne, in welcher ein Gas in der Atmosphäre verbleibt und dort wirksam ist, bevor es abgebaut bzw. durch einen natürlichen Kreislauf aufgenommen wird. Diese Zeit ist für jedes Gas unterschiedlich. Methan beispielsweise ist nach zehn Jahren abgebaut, während Kohlendioxid Hunderte von Jahren benötigt, um mehrheitlich, und über hunderttausend Jahre, um ganz aus der Atmosphäre entfernt zu werden. Einmal ausgestoßenes Kohlendioxid, das hauptsächlich anthropogene Treibhausgas, behält seine Wirkung dort daher für eine lange Zeit, auch nachdem die Emissionen aufgehört haben. (Kapitel 2.6, 3.2)

Die **Konzentration** bezeichnet die Menge eines Treibhausgases in der Atmosphäre. Im Falle zusätzlicher Emissionen, wie sie durch den Menschen verursacht werden, hat die Verweilzeit einen maßgeblichen Einfluss auf diese Menge, da sich ein lange verbleibendes Gas stärker ansammelt als ein weniger lang verbleibendes. **Emissionen** betreffen den Ausstoß von Treibhausgasen durch die Menschen, die Konzentration die daraus resultierende und dort wirksame Ansammlung in der Atmosphäre. Die Konzentration eines Gases kann in der Luft gemessen werden, das Maß ist Teile pro Volumen, meist Millionstel (*parts per million, ppm*). Emissionen hingegen werden anhand des emissionsverursachenden Verbrauchs (zum Beispiel von fossilen Brenn- und Treibstoffen) oder Handlungsweisen (zum Beispiel der Rodung von Wäldern) gemessen bzw. berechnet. Sie werden in Gewichtseinheiten des Gases angegeben. Emissionen können für jedes Land und für jede Tätigkeit einzeln berechnet werden, die Konzentration wird weltweit ermittelt, da sich die meisten Treibhausgase verteilen und global wirken. Emissionen sind der Fokus der Klimapolitik, da diese zum Ziel hat, die Emissionen zu reduzieren, und sie dazu misst. Für die Klimaänderung letztendlich ausschlaggebend ist jedoch die Konzentration in der Atmosphäre, denn auf ihr basiert die Temperatur auf der Erdoberfläche. Da jedes Treibhausgas eine andere Verweilzeit besitzt, sind Emissionen und die sich daraus ergebende Konzentration also zwei verschiedene Dinge: Hat ein Gas eine lange Verweilzeit, wie zum Beispiel Kohlendioxid, sammelt es sich stärker in der Atmosphäre an und die Konzentration verringert sich auch nach einem Stopp der Emissionen nur langsam. Die Konzentration eines kurzlebigen Gases wie Methan hingegen ist bei konstanten Emissionen stabiler und sinkt schon bald nach deren Rückgang.



Die **Stärke** eines Gases ist abhängig von der Absorptionsfähigkeit pro Molekül, also wie viel Energie ein Gas aufnehmen und wieder abstrahlen kann. Diese Stärke allein ist jedoch nicht sehr aussagekräftig, da die relative Wirkung von der Verweilzeit abhängt: Ein starkes Gas, welches sogleich wieder aus der Atmosphäre entfernt wird, kann eine geringere Wirkung haben als ein schwaches Gas, welches lange dort verbleibt.

Um dieser Situation gerecht zu werden und die Wirkung eines oder mehrerer Gase auf das Klima anhand der Menge (Konzentration oder Emission) unter gleichzeitiger Berücksichtigung der Stärke und der Verweilzeit zu quantifizieren, wurde von der Klimawissenschaft das Maß des **Strahlungsantriebs** entwickelt. Dieser misst den Energiefluss aus der Atmosphäre zur Erde und hat die Einheit Watt pro Quadratmeter ( $W/m^2$ ). Als einheitliches Maß für alle Treibhausgase kann damit deren Wirkung vergleichbar und aufsummierbar beschrieben werden. Da ein Gas aufgrund der unterschiedlichen Verweilzeiten je nach Zeitraum stärker oder schwächer wirkt, wird der Strahlungsantrieb immer für eine bestimmte Zeitspanne ermittelt. Im Falle der Konzentration der Treibhausgase normalerweise seit Anfang der Industrialisierung, als deren Ausstoß durch die Menschen begann, bis in die Gegenwart. Und für die Emissionen während einer bestimmten, festgelegten zukünftigen Zeitspanne, in der Regel hundert Jahre. (Kapitel 2.7)

Da die Wirkung der Gase mithilfe des Strahlungsantriebs untereinander vergleichbar wird, kann sie für jedes Gas auch in Form eines anderen Gases ausgedrückt werden. Anstatt des technischen Maßes des Strahlungsantriebs wird daher insbesondere außerhalb der Klimawissenschaft oft als Referenzgas Kohlendioxid eingesetzt und die einfacher nachvollziehbare Einheit der **Kohlendioxid-Äquivalente** ( $CO_2eq$  oder  $CO_2e$ ) verwendet. Sie beschreibt die Wirkung eines Gases, welches dieses in Form von Kohlendioxid hätte. Die Information ist jedoch dieselbe wie beim Strahlungsantrieb. Im Falle der Emissionen wird der Umrechnungsfaktor **Treibhauspotenzial** genannt. (Kapitel 2.7)

Mittels des Strahlungsantriebs kann also berechnet werden, welche **Wirkung die Treibhausgase** zusammen oder einzeln **seit der Industrialisierung** haben: Insgesamt betrug der Strahlungsantrieb 2011 **2,83  $W/m^2$**  (wobei die Unsicherheitsspanne zwischen 2,3 und 3,4  $W/m^2$  liegt), 2018 waren es 3,1  $W/m^2$ . Dabei machte 2011 der prozentuale **Anteil der einzelnen Treibhausgase** an der Konzentration von Kohlendioxid 64 %, von Methan 17 %, von Distickstoffmonoxid 6 % und der halogenierten Gase 13 % aus. Auch der Beitrag anderer Faktoren kann mittels des Strahlungsantriebs quantifiziert werden, da er grundsätzlich die

Energie misst, welche auf die Erde und deren klimatisches System einwirkt. Diese reduzieren insgesamt den Wert, da insbesondere die vom Menschen ausgestoßenen Aerosole, kleine Schwebepartikel wie Ruß, kühlend wirken. Berücksichtigt man **alle menschenverursachten Effekte**, inklusive der kühlenden Wirkung der Aerosole, belief sich der anthropogene Strahlungsantrieb 2011 (laut Sachstandsbericht des IPCC von 2013) auf insgesamt  $2,3 \text{ W/m}^2$ . Hinzu kommt der natürliche Einfluss der Sonnenaktivität von  $0,05 \text{ W/m}^2$ .

Obige Zahlen geben den Effekt der sich in der Atmosphäre angesammelten Treibhausgase, also der *Konzentration*, wieder. Basierend auf den **Emissionen** kann mittels des Strahlungsantriebs auch die Wirkung verschiedener *Aktivitäten* über einen gewissen zukünftigen Zeithorizont, üblicherweise (und in diesem Fall) hundert Jahre, ermittelt, also den *Quellen* zugeordnet werden: Weltweit wurden 2010 rund 60 % der Emissionen durch die energetische Nutzung fossiler Brenn- und Treibstoffe verursacht, 20 % durch die Landnutzung und Landwirtschaft, und weitere 20 % durch industrielle Prozesse, die Abwasser- und Abfallentsorgung und die Bereitstellung fossiler Brenn- und Treibstoffe. Insgesamt sind etwa 70 % der Emissionen mit der Nutzung von Energie verbunden. (Kapitel 3.4, 5.5)

### 1.3 Auswirkungen auf die Temperatur

Schwieriger, da von zahlreichen Faktoren abhängig, ist die Ermittlung der Auswirkungen des Strahlungsantriebs auf die **Temperatur**, die sogenannte **Klimasensitivität**. Strahlungsantrieb und Temperatur verhalten sich zwar proportional zueinander. Doch welches Verhältnis hier genau zur Anwendung gelangt, ist unsicher, was vor allem an den Rückkopplungen liegt: Der Strahlungsantrieb wird durch *externe* Faktoren, sogenannte **Klimaantriebe** verursacht, worunter momentan in erster Linie die erhöhte Konzentration der Treibhausgase fällt. Die Temperaturänderung wird aber auch durch **Rückkopplungen** beeinflusst, *interne* Reaktionen des Klimasystems auf die erhöhte Temperatur, welche die ursprüngliche Wirkung der externen, den Strahlungsantrieb auslösenden Klimaantriebe verstärken oder abschwächen. Schmelzen beispielsweise Eisflächen aufgrund der durch die anthropogenen Treibhausgase erhöhten Temperatur, wird weniger Sonnenlicht durch die Erdoberfläche reflektiert, was die Erwärmung verstärkt. Das ist ein Rückkopplungseffekt. Die genaue Wirkung der Rückkopplungen ist schwer vorherzusagen und stellt den größten Unsicherheitsfaktor in der Vorhersage der Temperaturerhöhung dar. (Kapitel 2.5)

Die Klimawissenschaft geht momentan (Stand IPCC-Bericht von 2013/2014) davon aus, dass  $1 \text{ W/m}^2$  Strahlungsantrieb zu einer **Temperaturerhöhung** nach Erreichen des energetischen Gleichgewichts (genannt Gleichgewichts-Klimasensitivität) von zwischen  $0,4^\circ\text{C}$  und  $1,2^\circ\text{C}$  führt, was einen Mittelwert von  $0,8^\circ\text{C}$  ergibt. Nimmt man den oben erwähnten Netto-Strahlungsantrieb des Jahres 2011 von  $2,35 \text{ W/m}^2$ , so führt das zu einer Temperaturerhöhung von  $1,9^\circ\text{C}$  ( $2,35 \cdot 0,8^\circ\text{C}$ ). Von diesen  $1,9^\circ\text{C}$  waren 2011  $0,85^\circ\text{C}$  erreicht. Die Differenz ist auf die Verzögerung der Erderwärmung, die sogenannte **thermische Trägheit**, zurückzuführen. Die Erde braucht, wie alle Materie, die einer Wärmequelle ausgesetzt ist, eine Weile, bis sie sich erwärmt. Die  $1,9^\circ\text{C}$  sind eine Schätzung, wo sich die Temperatur unter bestimmten Voraussetzungen einpendeln wird, wenn sich die Wirkung des Strahlungsantriebs von  $2,35 \text{ W/m}^2$  vollständig manifestiert hat. Es ist die Temperatur, auf welche wir unter diesem Strahlungsantrieb, wenn er unverändert bliebe, mittelfristig zusteuern. Die Zahl ist jedoch theoretischer Natur, da sich der Strahlungsantrieb aufgrund natürlicher Prozesse und abhängig von den zukünftigen Emissionen verändert. Würden die Emissionen zum Beispiel auf null gesenkt, würde die Temperatur vorerst etwa auf dem dann erreichten Niveau verbleiben, bevor sie sehr langsam wieder zu sinken beginnt. Auch sind bei dieser Berechnung nur bestimmte Rückkopplungen berücksichtigt, welche sich innerhalb von einem bis wenigen Jahrhunderten einstellen. Rückkopplungen, welche länger dauern, um ihre Wirkung zu entfalten, könnten die Temperatur noch merklich weiter erhöhen. Die Zahl vermittelt dennoch einen Eindruck der Größenordnungen der Auswirkungen auf die Temperatur eines erreichten Strahlungsantriebs. (Kapitel 2.8, 6.2)

Eine alternative Methode, den Temperaturanstieg vorauszusagen, basiert auf den **kumulierten ausgestoßenen Kohlendioxidemissionen**. Diese erlauben ebenfalls eine Berechnung der daraus resultierenden Temperaturänderung. (Die anderen Treibhausgase und die Aerosole werden dabei nicht berücksichtigt, haben aber geringere Auswirkungen.) Daraus kann ein Kohlenstoffbudget abgeleitet werden, nach dessen Verbrauch eine bestimmte Temperatur erreicht wird. Per Anfang 2018 verblieb ein **Kohlenstoffbudget** von  $580 \text{ Gt CO}_2$ , um mit einer Wahrscheinlichkeit von 50 %, und von  $420 \text{ Gt CO}_2$ , um mit einer Wahrscheinlichkeit von 2/3 die Erwärmung auf  $1,5^\circ\text{C}$  zu begrenzen. Im ersten Fall dauert es unter den heutigen Emissionen von rund  $42 \text{ Gt CO}_2$  pro Jahr und bei einer linearen Abnahme **30 Jahre**, im zweiten Fall **20 Jahre**, bis die Emissionen auf null reduziert werden müssten, um das Ziel zu erreichen. Diese Einsicht liegt

den heutigen politischen Bestrebungen zugrunde, die Emissionen weltweit bis spätestens zum Jahr 2050 auf netto Null zu senken. Bleiben die Emissionen auf dem **heutigen Niveau** (im Moment steigen sie tendenziell an), so ist das Budget im ersten Fall in **14 Jahren** aufgebraucht, im zweiten Fall dauert es **10 Jahre**. Bei einer Erdbevölkerung von 7,6 Milliarden Menschen im Jahr 2018 beträgt das Budget **76 Tonnen pro Person** im ersten und **55 Tonnen** im zweiten Fall. Die durchschnittlichen Emissionen liegen weltweit bei 5,4 Tonnen CO<sub>2</sub> pro Person und Jahr. Dabei ist zu beachten, dass diese Vorhersagen für einen Zeithorizont von 70 Jahren gemacht werden und dass nicht alle Rückkopplungen berücksichtigt sind. Die endgültige Temperaturerhöhung wird voraussichtlich höher ausfallen. (Kapitel 6.3)

## 1.4 Emissionen: Messung und Analyse

Gemessen bzw. berechnet werden, wie erwähnt, die Konzentration von Treibhausgasen in der Atmosphäre und deren Emissionen auf der Erde. Erstere sind vor allem für die Klimawissenschaft von Interesse, während sich die Politik auf die zu beseitigende Ursache, also die Emissionszahlen konzentriert. Bei der Beobachtung von Emissionen gibt es verschiedene Ansätze, welche alle korrekt sind, aber zu sehr unterschiedlichen Einschätzungen führen können, derer man sich bewusst sein sollte.

Vorweg ein paar grundsätzliche Hinweise: Emissionen unterliegen meist jährlichen Schwankungen. Der **gewählte Zeitraum** für einen Vergleich kann daher wichtig sein. Wird nur ein Anfangs- und Endzeitpunkt verglichen, kann dies zu einem zufälligen Resultat führen, wenn ein Jahreswert nicht dem Trend entspricht oder ein solcher gar nicht existiert. Daher sollte eine längere Zeitspanne auch immer anhand einer Entwicklung der Werte zwischen Anfangs- und Endpunkt untersucht werden, um längerfristige Bewegungen festzustellen. Anfangszeitpunkt und Vergleichsjahr für die Messung von Emissionen (»Basisjahr«) ist auf der nationalen und internationalen Ebene meist 1990. Ab hier existieren in der Regel verlässliche Daten. Früheste Schätzungen der Emissionen aller Treibhausgase gibt es weltweit für die Zeit ab 1970, diejenigen für Kohlendioxid reichen zurück bis an den Anfang der Industrialisierung um 1750. Ebenfalls zu berücksichtigen bei der Entwicklung ist das **Anfangsniveau**, insbesondere bei Vergleichen verschiedener Gebietskörper und bei einer prozentualen Zu- oder Abnahme: Wurden in der Vergangenheit die Emissionen schon reduziert oder

stiegen diese gar nicht erst an, ist das Anfangsniveau also tief, gibt es auch weniger zu reduzieren. Beim Vergleich von Zahlen muss zudem darauf geachtet werden, dass die Berechnung, zum Beispiel in verschiedenen Ländern, **derselben wissenschaftlichen Methodik** unterliegen. Denn je nach Berechnungsweise können die Werte anders herauskommen. Und schließlich sei erwähnt, dass eine Kenntnis der **Qualität von Quellen** wichtig ist. Es wurde in diesem Buch überall darauf geachtet, erfahrungsgemäß verlässliche und gut etablierte Quellen zu verwenden.

Nachfolgend werden die wichtigsten inhaltlichen Aspekte, auf die man achten sollte, beschrieben.

Eine zentrale Unterscheidung besteht zwischen der Betrachtung der gesamten Emissionen innerhalb eines Gebiets und den Pro-Kopf-Emissionen. **Absolute Emissionen** sind diejenigen aller Menschen bzw. im nationalen Kontext, aller Bewohner eines Landes. Dies lässt zwei bedeutende Aspekte außer Betracht: Bei der zeitlichen Entwicklung der Emissionen die **Zu- oder Abnahme der Bevölkerung**, mit welcher sich die Emissionen automatisch ebenfalls verändern. Und die Intensität pro Person, unabhängig von der Größe eines Gebiets. Beide werden durch die **Pro-Kopf-Emissionen** ermittelt. Nur diese Emissionen pro Person lassen den Schluss zu, ob die einzelnen Menschen mit der Zeit mehr oder weniger Emissionen ausstoßen und wie emissionsintensiv eine Bevölkerung lebt. Zwischen 1970 und 2018 haben sich die absoluten Treibhausgasemissionen weltweit mit einem Anstieg von 24,6 Gigatonnen (Gt) CO<sub>2</sub>eq auf 51,8 Gt CO<sub>2</sub>eq ungefähr verdoppelt. Im gleichen Zeitraum verdoppelte sich jedoch auch die Weltbevölkerung. Die weltweiten Pro-Kopf-Emissionen blieben daher nahezu konstant. (Bei genauerem Hinsehen ist die Korrelation zwischen Bevölkerungswachstum und Emissionen allerdings geringer, da große regionale Unterschiede existieren.) Neben der zeitlichen Entwicklung der Emissionen lässt sich mit den Pro-Kopf-Emissionen zudem ein Vergleich einzelner Gebiete mit verschiedenen Einwohnerzahlen anstellen. Dieser Wert ist aussagekräftiger als die absolute Zahl eines Landes, welche von der jeweiligen Größe der Bevölkerung abhängt. Während zum Beispiel Asien als Kontinent die höchsten Treibhausgasemissionen und den steilsten Anstieg aufweist, liegt der Pro-Kopf-Ausstoß mit rund 6 Tonnen CO<sub>2</sub>eq pro Person und Jahr immer noch deutlich unter denjenigen Europas mit 10 Tonnen CO<sub>2</sub>eq. Auch die Veränderung der **Wirtschaftsleistung** hat einen Einfluss auf die Emissionen und wird zur Analyse von deren Entwicklung einbezogen. (Kapitel 5.3)

Doch warum steigen die Emissionen gerade in Asien? Inwieweit liegt es daran, dass in einer globalisierten Welt Asien und insbesondere China für den Rest der Welt in immer größerem Ausmaß Waren produziert? Und welcher Zusammenhang besteht zwischen der Reduktion der Emissionen in den westlichen Industrienationen und dieser Verschiebung der Produktion? Auf diese Fragen wird eingegangen, wenn die Emissionen aus der **Produktionsperspektive** und der **Konsumperspektive** miteinander verglichen werden: Die offiziellen Erhebungen der Staaten auf der nationalen und internationalen Ebene messen Emissionen, welche durch die Produktion von Gütern und Dienstleistungen innerhalb eines Landes verursacht werden (genannt produktionsbedingt oder territorial, mit gewissen kleinen Unterschieden). Konsumbedingt hingegen sind die Emissionen, welche durch den Konsum von Gütern und Dienstleistungen in einem Land weltweit verursacht werden, also Exporte und Importe berücksichtigen. Diese Zahl wird durch Studien berechnet. In Ländern, die viel exportieren, wie China, sind die Emissionen der Produktion höher als die des Konsums, während in vielen europäischen Ländern der Fall umgekehrt liegt. Eine Gefahr besteht darin, dass mit der Reduktion der Produktionsemissionen, welche offiziell und unter den internationalen Vereinbarungen einzig ausschlaggebend sind, die Emissionen ins Ausland verschoben werden und dann dort weiter anfallen, weil der Konsum im Inland fortbesteht. In welchem Ausmaß dies zutrifft, wird wissenschaftlich untersucht und die Ergebnisse fallen unterschiedlich aus. (Kapitel 5.4)

Nicht zu verwechseln mit dieser Frage der teilweise im Ausland verursachten konsumbedingten Emissionen ist die **Reduktion im Ausland** von Emissionen zur Erreichung von Zielen unter nationalen und internationalen Vorgaben. Eine solche Reduktion geschieht mittels finanzieller Unterstützung emissionsmindernder Projekte im Ausland oder dem Handel mit Emissionsrechten, wenn unter internationalen Regeln die Anrechnung von Reduktionen anderer Länder an die eigenen Zielsetzungen erlaubt ist. Solche ausländischen Reduktionen ermöglichen Maßnahmen dort, wo dies am kostengünstigsten ist. Andererseits ist eine Überprüfung der notwendigen Zusätzlichkeit der Reduktion oft schwierig und wurde in der Vergangenheit durch Untersuchungen in großem Ausmaß infrage gestellt. Zudem werden im Ausland falsche Anreize (Verkauf von Emissionsrechten anstatt eigene Reduktion) gesetzt. Längerfristig fällt diese Möglichkeit ohnehin weg, da alle Staaten der Erde ein Ziel von null Emissionen anstreben, womit auch im Ausland keine zu reduzierenden Emissionen mehr anfallen können. (Kapitel 7.4)

Kohlendioxidemissionen werden vor allem durch die Nutzung fossiler Brenn- und Treibstoffe verursacht. Hinzu kommt die weitere wichtige Quelle der **Landnutzungsänderungen**. Emissionen fallen hier in erster Linie durch das Abholzen von Wäldern zur Gewinnung von Agrarland an. Umgekehrt führen Aufforstungen zu einer vermehrten Aufnahme von Kohlendioxid und das Land wird zur sogenannten Senke. Pflanzen nehmen während der Wachstumsphase Kohlendioxid auf, um es in Form von Kohlenstoff in ihre Substanz einzubauen. Beim Absterben geben sie es als Kohlendioxid wieder ab. Bleibt die Vegetationsfläche unverändert, existiert ein Gleichgewicht von Aufnahme und Abgabe, da eine nachwachsende Pflanze das Kohlendioxid der abgestorbenen wieder aufnimmt. Greift der Mensch mit Landnutzungsänderungen, also der Änderung im Bestand von Vegetationsflächen, in diesen Kreislauf ein, kommt es zu vermehrter Abgabe oder Aufnahme von Kohlendioxid. Landnutzungsänderungen sind bei manchen Emissionserhebungen berücksichtigt, bei anderen nicht. Außerhalb der Tropen ist der Wald seit etwa 1970 eine Kohlenstoffsénke, aufgrund einer Zunahme der Waldflächen wird mehr Kohlendioxid aufgenommen als abgegeben. In den Tropen hingegen wird die Waldfläche durch Abholzung verringert. Im Endeffekt sind Landnutzungsänderungen weltweit zu einer bedeutenden Quelle für CO<sub>2</sub> geworden, welche netto etwa 10 Prozent aller Kohlendioxidemissionen ausmacht. (Kapitel 5.6)

Eine weitere Besonderheit stellt der **internationale Luft- und Schiffsverkehr** dar: Der durch ein Land in diesem Sektor verursachte Anteil ist bei den offiziellen nationalen, territorialen Zahlen unter den internationalen Abkommen nicht enthalten, da er anders als der Inlandsverkehr nicht auf dem Territorium eines einzelnen Staats ausgestoßen wird. Er kann aber auf der Basis des dort getankten Treibstoffes oder der Emissionen entsprechender inländischer Transportunternehmen berücksichtigt werden. Beim Flugverkehr müssen die CO<sub>2</sub>-Emissionen mit einem Faktor zwei bis drei multipliziert werden, um alle klimawirksamen Effekte miteinzubeziehen. Der so berechnete Anteil des internationalen Flugverkehrs an den Treibhausgasemissionen kann in Industrieländern hoch sein und nimmt laufend zu. (Kapitel 5.7)

## 2 Naturwissenschaftliche Grundlagen

### 2.1 Die Physik der Sonnenstrahlung

**Sonnenstrahlen** sind, physikalisch betrachtet, **elektromagnetische Wellen**. Dabei handelt es sich um den Transport von **Energie** ohne stoffliches Trägermedium. Die Wellen können sich deshalb auch im Vakuum (materiefreien Raum), wie es annähernd im Weltraum herrscht, fortbewegen. Sie entstehen, wenn ein elektrisches und ein magnetisches Wechselfeld synchron zueinander schwingen und sich gegenseitig erzeugen. Aus der Energie des abnehmenden Feldes entsteht das sich aufbauende Feld, womit sich die Welle andauernd ohne weitere Energiezufuhr fortbewegt. Elektrische und magnetische Felder und das Gravitationsfeld sind Raumzustände, in welchen Kräfte auf eine begrenzte Distanz wirken (Kraftfelder). Elektromagnetische Wellen hingegen lösen sich mithilfe des beschriebenen Vorgangs vollständig von der Quelle. In der Quantenphysik werden diese Wellen als kleine Beträge (Quanten) von Energie beschrieben, **Photonen** genannt, und gelten als Elementarteilchen. Elektromagnetische Strahlung hat daher eine duale Natur, sowohl Wellen- als auch Teilchencharakter, welcher je nach experimenteller Anordnung in Erscheinung tritt, was einen in der Physik bisher unaufgelösten Widerspruch darstellt.<sup>2</sup>

Elektromagnetische Wellen umfassen ein weites **Spektrum**, von den langen Radiowellen, der infraroten Strahlung über das Licht und die ultraviolette Strahlung bis zu kurzwelligigen Röntgen- und Gammastrahlen. Sie werden anhand ihrer Wellenlänge (in Nanometer) und Frequenz (Schwingungen pro Zeiteinheit, in Hertz) umschrieben, welche im Verhältnis zueinander stehen: umso kleiner die Wellenlänge, umso höher die Frequenz und die Energie der Photonen. Hinzu kommt die Energie pro Zeiteinheit (Strahlungsfluss), welche von der Zahl der Lichtquanten innerhalb einer Zeitspanne abhängt und in Watt gemessen wird.

Elektromagnetische Strahlung kann auf mehrere Arten natürlich oder künstlich erzeugt werden. Radio- oder Funkwellen sind künstlich, haben aber dieselben physikalischen Eigenschaften wie solche natürlichen Ursprungs. Sonnenstrahlen gehören zu denjenigen natürlichen Wellen, welche durch die **Wärme** eines Körpers generiert werden. Jeder Körper (Festkörper, Flüssigkeit, Gas)

---

<sup>2</sup> Siehe zum Ganzen z.B. Montwill, Breslin (2013) und Feynman (1985), S.13–15, 36–38, 84–85. Das Thema wird in allen einschlägigen Lehr- und Fachbüchern eingehend dargestellt.



mit einer Temperatur über dem absoluten Nullpunkt von 0 Kelvin, was auf alle Materie zutrifft, verliert durch Molekülbewegungen verursachte (Wärme-) Energie und strahlt diese in Form von elektromagnetischen Wellen ab. **Wärmeenergie** (thermische Energie) kann auf drei Arten übertragen werden: Mittels stofflicher Träger durch Wärmeleitung (Transport in einem Stoff, zum Beispiel Metall), Konvektion (Transport zusammen mit dem Stoff, zum Beispiel in der Luft oder im Wasser) oder eben durch elektromagnetische Wellen. Letzteres wird **Wärmestrahlung** (thermische Strahlung, Temperaturstrahlung, *thermal radiation*) genannt (der Begriff wird manchmal auch nur für einen gewissen Wellenlängenbereich des elektromagnetischen Spektrums verwendet). Wärmestrahlung besitzt nicht eine einzelne Frequenz, sondern umfasst theoretisch das ganze elektromagnetische Spektrum, wobei je nach Temperatur der Energiequelle die Intensität der Strahlung bis zu einer gewissen Frequenz ansteigt und dann schnell abflaut (Plancksches Strahlungsgesetz, Wiensches Verschiebungsgesetz). Die elektromagnetischen Wellen der **Sonne** enthalten vor allem infrarote Strahlung, Licht und ultraviolette Strahlung. Das menschliche Auge nimmt Strahlung zwischen etwa 400 bis 760 Nanometern als **Licht** wahr. Diese Wellenlänge wird ab einer Temperatur des Strahlers von ca. 600 °C erzeugt, dann fängt ein Körper an sichtbar zu glühen. Die langwelligere **infrarote Strahlung** ist nicht sichtbar, wird aber in der Haut durch die Absorption als Wärme empfunden. **Ultraviolette Strahlung** nehmen wir nicht wahr, sie hat aber Wirkungen auf Haut und Augen.

## 2.2 Wechselwirkungen zwischen Strahlung und Materie

Die Sonnenstrahlung durchquert die Atmosphäre und trifft auf die Erde, wobei sie dabei physikalischen Prozessen ausgesetzt ist, deren Kenntnis grundlegend für das Verständnis des Treibhauseffekts ist. Treffen **elektromagnetische Wellen** auf **Materie** (Festkörper, Flüssigkeit, Gas), treten verschiedene **Wechselwirkungen** auf. Die Photonen der Strahlung prallen auf die Elektronen der Materie, abhängig von der Energie jeder Seite mit unterschiedlichem Resultat. Strahlung kann absorbiert, gestreut, reflektiert, transmittiert, gebrochen, gebeugt und polarisiert werden. Die Definition und Einteilung dieser teilweise sich überschneidenden oder sich gegenseitig enthaltenden Begriffe ist historisch bedingt und wird nicht immer einheitlich vorgenommen. Eine im vorliegenden Kontext sinnvolle Gruppierung ist diejenige in **Absorption, Reflexion und Transmission**, je nachdem, ob Strahlung aufgenommen und in einer anderen Wellenlänge abge-

strahlt, zurückgeworfen oder durchgelassen wird. Die einzelnen Phänomene treten meist in einer Kombination auf, indem je ein Teil der Strahlung eine andere Wechselwirkung durchläuft. Die Summe dieser drei Teile ergibt wieder die Energie der einfallenden Strahlung.

Im Falle der **Absorption** wird die Energie der Strahlung von der Materie *aufgenommen und in eine andere Form überführt*. Meist handelt es sich dabei um thermische Energie und diese erhöht die Temperatur des Körpers. Das äußert sich in einer Abstrahlung elektromagnetischer Wellen mit einer Wellenlänge, welche der Temperatur des absorbierenden Körpers entspricht und daher in der Regel von der Wellenlänge der einfallenden Strahlen abweicht. Ist der absorbierende Körper nach der Absorption kühler als der Strahler, so ist die Abstrahlung langwelliger als die ankommende Strahlung, ist er wärmer, führt dies zu einer kurzwelligeren Abstrahlung. Die Wärme an sich wird also erst bei der Ankunft der Strahlung erzeugt, durch deren Interaktion mit der Materie.

Wird das Photon nicht absorbiert, sondern *in der Richtung abgelenkt*, erfährt es meistens keine Änderung in der Wellenlänge. Vorgänge dieser Art werden häufig unter dem Oberbegriff der **Streuung** (*scattering*) zusammengefasst, die Terminologie ist jedoch in diesem Bereich nicht einheitlich.<sup>3</sup> Elektromagnetische Wellen können vorwärts, in der Einfallrichtung oder in alle Richtungen abgelenkt werden (was auch zu unterschiedlichen optischen Phänomenen führt). Verschiedene Arten der Streuung treten oft in Kombination auf und die Streuung erfolgt in eine Richtung mehr als in eine andere. Wird der Strahl zurückgeworfen, nennt man das normalerweise **Reflexion**. Erfolgt dies gebündelt in einer Richtung, liegt eine Spiegelung vor (*specular reflection, regular reflection*), wird der Strahl in verschiedene Richtungen zurückgeworfen, eine diffuse Reflexion (*diffuse reflection*).

Passiert der Strahl die Materie, spricht man generell von **Transmission**. Das Photon durchquert in diesem Fall das Medium, wobei es beim Auftreffen auf ein Elektron in der Richtung nach vorne abgelenkt (vorwärts gestreut) wird oder auf kein Elektron trifft und die Richtung nicht ändert.

Auf der atomaren Ebene existieren nur zwei grundsätzliche Arten der Wechselwirkung (neben dem Fall, in welchem das Photon die Materie passiert, ohne

---

<sup>3</sup> Siehe zum Thema z. B. Schmidt (2000), 7.1 (S. 273–274); Warnecke (1997), 3.5.6; Weischet, Endlicher (2018), 5.2 (S. 48), welche unter diffuser Reflexion eine Strahlung in alle Richtungen verstehen; Feynman (1984), S. 107; Bohren (2010), 7.2–7.3; Bohren (1995), S. 405 ff; Bohren, Huffman (1983), S. 3 ff.

auf ein Atom zu treffen), die Absorption und die Ablenkung in der Richtung.<sup>4</sup> Was also mit elektromagnetischen Wellen geschieht, wenn sie auf ein Medium treffen, hängt von Absorptions- und Streuvorgängen ab. Im Falle der Absorption wird die Energie umgewandelt und in einer anderen Wellenlänge in alle Richtungen wieder abgestrahlt, während die Streuung in der Regel eine Umverteilung der Strahlung in andere Richtungen auf derselben Wellenlänge verursacht.

## 2.3 Wechselwirkungen in der Atmosphäre und der Treibhauseffekt

Die Sonnenstrahlen treffen vom Vakuum des Weltraums auf die Erdatmosphäre und die darin vorkommende Materie. Die **Atmosphäre** ist eine von der Schwerkraft des Planeten festgehaltene Gashülle, welche sich von der Erdoberfläche bis zu rund 1000 km Höhe erstreckt und aus **Gasen** (»Luft«), **Wasser** in (neben dem gasförmigen Wasserdampf) flüssigem oder festem Zustand (zum Beispiel Wassertropfen oder Eiskristalle) und **Aerosolen** besteht. Die Anteile der Gase entfallen ohne Wasserdampf zu 99 % auf Stickstoff (N<sub>2</sub>, 78 %) und Sauerstoff (O<sub>2</sub>, 21 %). Der Wasserdampf macht je nach Temperatur zwischen 0,4 % und 4 % aus, was durch seine Zustandsänderung von gasförmig in flüssig oder fest bedingt ist. Der verbleibende Teil besteht aus Spurengasen, die nur in sehr geringen Mengen vorkommen, wie zum Beispiel Argon, Kohlendioxid, Ozon oder halogenierte Gase. Aerosole sind feste oder flüssige Schwebepartikel in der Atmosphäre wie Mineralstaub, Meersalz, Ruß, Asche von Vulkanausbrüchen oder Sulfatpartikel. Sie können wie die anderen Bestandteile der Atmosphäre natürlicher oder menschlicher Herkunft sein.

Beim Eintritt der Sonnenstrahlen in die Atmosphäre treten zwischen diesen und den Gasmolekülen, Wasserteilchen und Aerosolen, auf die sie treffen, die oben beschriebenen Wechselwirkungen auf. Die Strahlung wird abhängig von deren Wellenlänge und der Beschaffenheit der Materie, mit welcher sie kollidiert, absorbiert und in alle Richtungen abgestrahlt oder gestreut und damit in der Richtung abgelenkt. Durch die **Absorption und Reflexion** wird ein Teil wieder in die Einfallsrichtung zurückgestrahlt und die Intensität der Energie in der Vorwärtsrichtung abgeschwächt, ein Prozess, welcher in der Atmosphärenphysik als **Extinktion** bezeichnet wird. Die Absorption bewirkt zudem, dass die

---

4 Bohren (1987), S. 525.

kurzwellige Sonnenstrahlung in langwelligere (da die Materie in der Atmosphäre auch nach der Absorption kühler ist als die Sonne), weiter im infraroten Bereich liegende Strahlung umgewandelt wird. Dabei erwärmt sich die Atmosphäre und somit die Luft. Einmal auf der Erdoberfläche angelangt, wird die Strahlung wiederum entweder absorbiert (was die Erdoberfläche erwärmt) und in einer kürzeren Wellenlänge abgestrahlt oder reflektiert.

Der *reflektierte* Anteil einer Strahlung nennt sich die **Albedo**. Es wird zwischen der Bodenalbado und der gesamten, Boden und Atmosphäre einschließenden planetaren Albedo unterschieden. Die gesamte durch die Atmosphäre und Erde reflektierte Strahlung beträgt etwa 30 % der einfallenden Sonnenstrahlung, während 70 % von Atmosphäre und Erdoberfläche *absorbiert* werden und diese erwärmen.<sup>5</sup> Dies führt zu einer langwelligeren Abstrahlung innerhalb der Atmosphäre und vom Boden.

Die von der Sonne ankommende Strahlung ist demnach kurzwelliger als die von der Erde abgestrahlte Energie. In der Atmosphäre vorkommende **Treibhausgase** lassen das einfallende kurzwellige Sonnenlicht im beschriebenen Ausmaß passieren, absorbieren jedoch einen großen Teil der vom Boden abgegebenen langwelligeren Strahlung, da diese nun eine andere Energie besitzt, und geben sie in alle Richtungen, unter anderem zur Erde hin gerichtet als Gegenstrahlung, wieder ab. Die so entstehende zusätzliche Strahlung ist etwa doppelt so hoch wie die Strahlung, welche die Erdoberfläche direkt von der Sonne erreicht, und führt zu einer weiteren Erwärmung. Dieses Phänomen wird **Treibhauseffekt** genannt und ermöglicht Temperaturen in einem für die Entwicklung von Lebewesen günstigen Bereich.<sup>6</sup>

Jede Dämmschicht führt zu einer Reduktion des Entweichens von Wärmeenergie. Ist diese anliegend, fließt Wärme vom wärmeren zum kälteren Körper (Wärmeleitung), was einen Wärmeverlust, wenn auch einen langsameren als ohne die Isolation, zur Folge hat. Strahlung andererseits wird berührungslos übertragen und fließt unabhängig von einer Temperaturdifferenz. Wird Energie hier nicht oder weniger stark durchgelassen, ist der Grund dafür eine Rückstrahlung (Absorption und Reflexion). Das trifft auch auf die Atmosphäre

---

5 IPCC, AR5 WGI, 1.1.2 (S. 126), 2.3.1 (S. 181–182); Häckel (2016), 3.2.3 (S. 195–201); Weischet, Endlicher (2018), 7.1 (S. 85–88); Roedel, Wagner (2017), 1.2 (S. 19–23), 1.4.2 (S. 56–61). Die Zahlen der einzelnen Autoren weichen etwas voneinander ab.

6 IPCC, AR5 WGI, 1.1.2 (S. 126), Glossary »Greenhouse Effect« (S. 1455); IPCC AR4 WGI, FAQ 1.1 (S. 96), FAQ 1.3 (S. 115–116).

zu. Diese ist jedoch nicht einfach eine Dämmschicht, welche Energie zurückhält. Das Besondere an der Atmosphäre ist, dass sich die ursprüngliche Quelle der Wärmeenergie, die Sonne, außen im All befindet, und Energie ins System hinein-, aber weniger gut hinausgelassen wird. Dieser Effekt entspricht dem eines Treibhauses, da Glas für die kurzwellige Sonnenstrahlung fast vollständig durchlässig ist, für die langwellige Wärmestrahlung, welche vom erwärmten Boden ausgeht, aber weitgehend undurchlässig. Bei Glashäusern spielt allerdings vor allem die fehlende Durchlüftung und somit Unterdrückung der Konvektion eine Rolle, welche die warme Luft am Entweichen hindert, während die zusätzliche Wärmequelle aufgrund der Absorption und Emission durch das Glas der vom Boden abgestrahlten Wärme (wie im Fall der Atmosphäre) weniger ins Gewicht fällt. Der Vergleich mit dem Treibhaus ist daher technisch nicht ganz richtig, entspricht aber der beobachteten Wirkung in der Atmosphäre.<sup>7</sup>

Die Atmosphäre sorgt zudem für eine ausgeglichene Temperatur zwischen den Jahreszeiten, Tag und Nacht sowie tagsüber durch die Streuung der Sonnenstrahlung für einen blauen Himmel. Auf dem Mond, welcher praktisch keine Atmosphäre besitzt, ist der Temperaturunterschied zwischen den Zeiten mit und ohne Sonnenbestrahlung sehr viel größer und der Himmel immer schwarz.<sup>8</sup>

Der Treibhauseffekt ist ein natürlicher Vorgang, kann aber durch Eingriffe des Menschen beeinflusst werden. Die wichtigsten Treibhausgase werden sowohl auf natürliche Art und Weise als auch durch menschliche Aktivitäten freigesetzt, ein paar Gase sind ausschließlich menschlichen Ursprungs. Von den sechs existierenden Arten von Treibhausgasen werden vier direkt durch den Menschen erzeugt: Kohlendioxid, Methan, Distickstoffmonoxid und die Gruppe der halogenierten Gase, welche in erster Linie künstlich produziert werden. Die zwei weiteren Gase Wasserdampf und Ozon werden nur indirekt durch den Menschen beeinflusst. Man unterscheidet, um dieser Situation gerecht zu werden, zwischen dem bestehenden, natürlichen Treibhauseffekt und dem menschenverursachten sogenannten **anthropogenen Treibhauseffekt**.<sup>9</sup> Der natürliche Treibhauseffekt wird zu rund 66 % durch Wasserdampf, zu rund 30 % durch Kohlendioxid sowie

---

7 Siehe z. B. Weart (2003), S. 3; Bolin (2007), S. 6.

8 Auf dem Mond schwankt die Temperatur zwischen über 100 °C am Tag und rund -150 °C in der Nacht. Der Mond-Tag dauert einen Monat und diese langen Zeiträume wirken sich vermutlich ebenfalls auf die Temperatur aus, aber ein starkes Temperaturgefälle wird auch bei Mondfinsternissen beobachtet. Pierrehumbert (2010), 1.2 (S. 5–6).

9 IPCC, AR5 WGI, Glossary »Anthropogenic« (S. 1448); IPCC AR4 WGI, FAQ 2.1 (S. 135–137), FAQ 7.1 (S. 512–513).

in geringerem Ausmaß durch Methan, Distickstoffmonoxid und Ozon herbeigeführt.<sup>10</sup> Der anthropogene Treibhauseffekt bezeichnet die Wirkung der zusätzlichen, vom Menschen ausgestoßenen Treibhausgase. Dadurch wird der Anteil der genannten natürlichen Gase erhöht und es werden weitere, synthetische Treibhausgase (die halogenierten Gase, siehe dazu eingehend Kapitel 5.5) hinzugefügt.

## 2.4 Das Strahlungsgleichgewicht der Erde

Materie, welche Strahlung ausgesetzt ist und diese absorbiert, erhöht wie in Kap. 2.2 gesehen ihre Temperatur und strahlt auf diese Weise die aufgenommene Energie wieder ab. Das passiert abhängig von dieser Temperatur auf einer von der einfallenden Strahlung unterschiedlichen Wellenlänge. Physikalisch muss Energie, welche absorbiert wird, auch wieder abgegeben werden (Kirchhoffsches Strahlungsgesetz). Es herrscht ein **energetisches (thermisches) Gleichgewicht** zwischen aufgenommener und abgestrahlter Energie. (Der je nach den Wellenlängen der einfallenden Strahlung nicht absorbierte Anteil wird reflektiert oder transmittiert.) Im Falle einer Zunahme der Einstrahlung strebt das gestörte System durch die Temperaturerhöhung des absorbierenden Körpers auf ein neues Gleichgewicht zu. Wenn absorbierte Energie nicht wieder abgestrahlt würde, hätte das zur Folge, dass einer Strahlung ausgesetzte Materie immer wärmer würde, bis sie dieselbe Temperatur wie die Quelle der Strahlung hat, was nicht der Fall ist. Diese grundlegende Entdeckung geht auf Joseph Fourier (1768–1830) zurück.<sup>11</sup> Die Erde und ihre Atmosphäre bilden ein solches System, in welchem ein energetisches Gleichgewicht zwischen der einfallenden kurzwelligigen Sonnenstrahlung und der von der Erde und Atmosphäre ins All abgestrahlten langwelligigen Strahlung herrscht.<sup>12</sup>

Die von einem Körper abgestrahlte thermische Energie ist also abhängig von dessen Temperatur. Die **Temperatur** ( $T$ ) misst die innere Energie, während die fließende, abgegebene Energie elektromagnetischer Wellen, der **Strahlungsfluss** (Energie pro Zeitspanne), in Watt ( $W$ ) gemessen wird. Die Energie pro Zeit und Fläche, auf die sie trifft, wird **Strahlungsflussdichte** ( $F$ ) genannt und die Einheit

---

10 Latif (2009), 1.5.2 (S. 57). Leicht andere Zahlen bei Schönwiese, Tabelle 9 (S. 79) mit einer Aufteilung zwischen natürlichem und anthropogenem Anteil.

11 Dessler (2016), 4.2. (S. 56); Weart (2003), S. 2.

12 IPCC, AR5 WGI, 1.2.2 (S. 126); Hartmann, Chapter 2 (S. 18 ff.).

ist Watt pro Quadratmeter ( $\text{W/m}^2$  oder  $\text{Wm}^{-2}$ ).<sup>13</sup> Das *Verhältnis zwischen Temperatur und abgestrahlter Energie* ist ein festes und wird durch das nach seinen Entdeckern benannte **Stefan-Boltzmann-Gesetz** mathematisch umschrieben: Strahlungsflussdichte  $F = \sigma T^4$ .<sup>14</sup> Die Konstante  $\sigma$  (sigma) wird als Stefan-Boltzmann-Konstante bezeichnet und besitzt den Wert  $5,67 \cdot 10^{-8}$  (also 0,0000000567)  $\text{W m}^{-2} \text{K}^{-4}$ . Somit kann die Energie der Strahlung berechnet werden, wenn die Temperatur des abstrahlenden Körpers bekannt ist, und umgekehrt. Da sich abgestrahlte und einfallende Energie im (sich letztendlich immer einstellenden) Gleichgewicht entsprechen, kann mittels dieses Gesetzes auch der Zusammenhang zwischen *einfallender* Strahlung und Temperatur berechnet werden. Und Ersteres ist im Fall der Erde die bekannte Größe der Sonnenstrahlung.

Die einfachste Art einer solchen **Strahlungsbilanz** (vorerst ohne Berücksichtigung der Treibhausgase in der Atmosphäre) setzt in Anwendung des Stefan-Boltzmann-Gesetzes  $F = \sigma T^4$  die einfallende Strahlung in Form der Energie der Sonnenstrahlung ( $S$ ) abzüglich der Reflexion (Albedo ( $\alpha$ )) in Relation mit der Temperatur ( $T$ ) der Erde:  $S/4 (1-\alpha) = \sigma T^4$ . Die Sonnenstrahlung  $S$  am oberen Ende der Atmosphäre wird dabei durch 4 geteilt, um die einfallende Strahlung auf der von der Sonne beschienenen Hälfte der Erdkugel zu ermitteln,<sup>15</sup> und mit einem Faktor ergänzt, welcher die Reflexion des Sonnenlichts durch Erde und Atmosphäre ( $\alpha = 30\%$  oder 0,3) berücksichtigt. Die Energie der Sonnenstrahlung kann aufgrund des Farbspektrums und der daraus berechneten Oberflächentemperatur der Sonne von rund  $6000^\circ\text{C}$  ermittelt werden und beläuft sich auf  $1360 \text{ W/m}^2$ . Das sind  $342 \text{ W/m}^2$  ( $1360/4$ ) an jedem Punkt, wo der Planet Strahlung empfängt. Wenn das reflektierte Sonnenlicht (30 %) abgezogen wird, beträgt die von der Erde absorbierte **Sonnenstrahlung  $240 \text{ W/m}^2$** . Gemäß der Berechnung mittels obiger Formel entspricht dies einer Temperatur der Erd-

13 »Pro« kann durch einen negativen Exponenten, einen Schrägstrich oder durch einen Bruch ausgedrückt werden. Watt pro  $\text{m}^2 = \text{Wm}^{-2} = \text{W}/\text{m}^2 = \text{W l}/\text{m}^2$ .

14 Das Gesetz ist nach Josef Stefan (1835–1893) und Ludwig Boltzmann (1844–1906) benannt, welche es zwischen 1879 und 1884 aufstellten. Es gilt in dieser Form für eine Situation, in der alle Strahlung absorbiert wird (sogenannter **schwarzer Strahler** (oder Körper), eine vollständige Absorption führt zur Farbe schwarz). Oft wird jedoch nicht alle Strahlung absorbiert, sondern ein Teil reflektiert oder durchgelassen. Um diesem Umstand gerecht zu werden, kann bei der Formel das **Emissionsvermögen** in Form eines Emissionskoeffizienten  $\epsilon$  (epsilon) eingesetzt werden, welcher zwischen 0 und 1 liegt:  $F = \epsilon \sigma T^4$ . Das Emissionsvermögen entspricht dem Absorptionsvermögen, also wie viel Strahlung absorbiert wird. Bei vollständiger Absorption ist der Koeffizient 1. Siehe z. B. Weischet, Endlicher (2018), 5.9.1 (S. 64), 6.1 (S. 75); Roedel Wagner (2017), 1.1.2 (S. 5–6).

15 Die vollständige Formel für die Sonnenstrahlung, welche auf die Erde trifft, beinhaltet den Erdradius  $R$  und lautet  $(S(1-\alpha)\pi R^2)/4\pi R^2$ , wobei mit  $\pi R^2$  gekürzt werden kann.

oberfläche von 255 K oder  $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ <sup>16</sup>, welche die Erde ohne die zusätzliche Erwärmung durch die Treibhausgase haben würde. Ohne Atmosphäre würde all diese Energie direkt ins All entweichen. Die **Treibhausgase** ändern diese Rechnung jedoch, indem sie zuerst ungefähr  $80\text{ W/m}^2$  der einfallenden Sonnenstrahlung absorbieren (in einem Prozess, in welchem ein Teil der absorbierten und in alle Richtungen wieder abgestrahlten Energie in den Weltraum und ein Teil auf die Erde gelangt), was dazu führt, dass nur rund  $160\text{ W/m}^2$  der **Sonnenstrahlung** die Erdoberfläche erreicht. Anschließend wird auch die von der Erde abgestrahlte, nun langwelligere Energie von den Treibhausgasen absorbiert und teilweise auf die Erde zurückgestrahlt, was eine nochmalige Strahlung von  $340\text{ W/m}^2$  aus der Atmosphäre verursacht und den **Treibhauseffekt** ausmacht. Die **gesamte Energie**, welche auf der Erde ankommt, beläuft sich demnach auf  $500\text{ W/m}^2$  ( $160 + 340$ ).<sup>17</sup>  $395\text{ W/m}^2$  wird wieder abgestrahlt, was unter dem Stefan-Boltzmann-Gesetz einer Temperatur von  $15\text{ }^{\circ}\text{C}$  (288 K) entspricht, die Durchschnittstemperatur auf der Erdoberfläche, und  $105\text{ W/m}^2$  werden durch die anderen Wärmetransportmechanismen der Konvektion und Konduktion abgegeben. Aus dieser Rechnung geht auch hervor, dass der natürliche Treibhauseffekt für eine Erwärmung von  $33\text{ }^{\circ}\text{C}$  verantwortlich ist.<sup>18</sup>

Der natürliche Treibhauseffekt ist somit Teil des energetischen Gleichgewichts der Erde. Solange die Energie der einfallenden Strahlung der abgegebenen entspricht, bleibt die Temperatur konstant. Wenn jedoch die Energie, welche die Erdoberfläche erreicht, ansteigt, ist das beschriebene Gleichgewicht gestört und in Reaktion darauf erwärmt sich die Erde (und in geringerem Ausmaß die Atmosphäre) und erhöht die Abstrahlung, bis das Gleichgewicht wieder hergestellt ist. Solche **Störungen** können auf natürliche Weise oder durch den Menschen verursacht werden. Veränderungen in der Umlaufbahn der Erde um die Sonne oder Vulkanausbrüche sind Beispiele für natürliche Einwirkungen. Die seit der Industrialisierung erhöhte Emission von Treibhausgasen durch den Menschen stellt ebenfalls eine Störung dar. Sie wird durch einen Anstieg der Temperatur auf der Erde korrigiert, bis diese mit der erhöhten Konzentration der Gase in der

16  $F = \sigma \cdot T^4$ , daher  $T = \sqrt[4]{(F/\sigma)}$  und  $T = \sqrt[4]{(240/(0,0000000567))} = 255$ . Siehe z. B. Dessler (2016), 4.2 (S. 56).

17 IPCC, AR5 WGI, 2.3.1 (S. 181), dort für heutige Verhältnisse. Die Zahlen weichen je nach Quelle etwas voneinander ab. Hier sind sie gerundet und der Anteil des anthropogenen Treibhauseffekts von wenigen  $\text{W/m}^2$  kann in dieser grundsätzlichen Veranschaulichung vernachlässigt werden. Siehe zum Ganzen (manchmal unter Einsatz des Emissionskoeffizienten) auch Cess (1976), S. 1832; Hartmann (1994), 2.5 (S. 26–27), 3.8 (S 61–63); Randall (2012), S. 39.

18 Siehe auch Schönwiese, Kapitel 6 (S. 42) und Text zu Tabelle 9 (S. 79).



Atmosphäre und der damit verursachten Veränderung der Einstrahlung übereinstimmt. Der menschenverursachte Einfluss hat 2018 zu einer zusätzlichen Strahlung von  $3,1 \text{ W/m}^2$  und einer (noch nicht abgeschlossenen) Erwärmung von rund  $1^\circ\text{C}$  geführt (siehe Kapitel 3.4, 6.1).

Mittels einer Berechnung unter dem Stefan-Boltzmann-Gesetz kann vorausgesagt werden, welche **Temperatur** ein Körper, der einer bestimmten Strahlung ausgesetzt wird, im Gleichgewicht haben wird. Diesen Umstand macht sich die Klimawissenschaft zunutze, um die Temperatur auf der Erde zu ermitteln, welche aus der erhöhten atmosphärischen Strahlung resultiert. Das beobachtete Ungleichgewicht des Strahlungshaushalts entspricht dem zu erwartenden Anstieg der Temperatur. (Siehe dazu die Rechnung in Kapitel 6.2, Anmerkung 258.) Die Strahlung ist jedoch nicht die einzige Ursache. Auch die Reaktion des Klimasystems auf der Erde spielt eine wichtige Rolle bei dieser Temperaturänderung, wie im nächsten Abschnitt gezeigt wird.

Die Erwärmung vollzieht sich mit einer gewissen zeitlichen Verzögerung, genannt **thermische Trägheit** (*thermal inertia*). Materie braucht eine gewisse Zeit, um sich zu erwärmen. Das kann man auch im Alltag beobachten. Ein Wärme ausgesetzter Gegenstand wird nicht plötzlich heiß, sondern erwärmt sich langsam. Das führt zu einem vorübergehenden Ungleichgewicht zwischen Einstrahlung und Abstrahlung bzw. Temperatur, bis sich Letztere auf einem Niveau befindet, das der absorbierten Strahlung entspricht, und das Gleichgewicht wieder hergestellt ist.

## 2.5 Klimaantriebe und Rückkopplungen

Die Klimawissenschaft unterscheidet zwischen zwei hauptsächlichen Faktoren, welche das Klima auf der Erde bestimmen: Klimaantriebe und Rückkopplungen.<sup>19</sup> **Klimaantriebe** (*climate forcings*) sind Kräfte, welche den Energiefluss von *außerhalb des klimatischen Systems* verändern und somit die oben erwähnte Strahlungsbilanz beeinflussen.<sup>20</sup> Sie sind unabhängig von internen Reaktionen

19 IPCC, AR5 WGI, TFE.6 (S. 82), 1.2.2 (S. 127 und Figure 1.2), Glossary »Climate feedback« (S. 1450), Glossary »Climate forcing« (S. 1526), verweisend auf Glossary »Radiative forcing« (S. 1461); Roedel, Wagner (2017), 10.2 (S. 541–545); Charlson (2000), 17.2–17.5 (S. 442–456).

20 Genau genommen existieren auch Klimaantriebe, welche ihre Wirkung nicht durch die Beeinflussung des Strahlungsantriebs ausüben. Sie werden *non-radiative forcings* oder *non-initial radiative effects* genannt und sind schwer von den Rückkopplungen zu unterscheiden. Ein Beispiel ist der Effekt einer Zunahme des Kohlendioxids in der Luft auf die Pflanzenphysiologie, wenn Pflanzen direkt auf die

des Klimasystems. Klimaantriebe können auch zu einer Reduktion der Strahlung führen (dann sind sie negativ) und somit eine kühlende Wirkung haben, zum Beispiel durch eine vermehrte Reflexion der Sonnenstrahlung. Die hauptsächlichen Klimaantriebe sind:<sup>21</sup>

- **anthropogene Treibhausgase**, gegenwärtig der bedeutendste Klimaantrieb;
- **Aerosole**, natürlich oder menschenverursacht, welche reflektierende (kühlende) und absorbierende Eigenschaften haben;
- **Veränderungen auf der Erdoberfläche** welche die Albedo, die Reflexion durch die Erdoberfläche, beeinflussen, beispielsweise durch die Rodung von Wäldern (erhöhte Rückstrahlung durch hellere Oberfläche);
- **Naturereignisse** wie zum Beispiel Änderungen in der Umlaufbahn der Erde um die Sonne, Sonnenaktivität, Meteoriteneinschläge und Vulkanausbrüche (durch Gase und Aerosole).

**Rückkopplungsmechanismen** (*feedbacks*) sind natürliche Prozesse *innerhalb des Klimasystems*, welche durch Klimaantriebe ausgelöst werden und die ursprüngliche Störung *verstärken oder abschwächen*. Zum Beispiel führt eine durch anthropogene Treibhausgase verursachte Temperaturerhöhung zum Schmelzen von Eis auf der Erdoberfläche, was die Reflexion von Sonnenlicht (Albedo) vermindert, diesmal in Reaktion auf die erhöhte Temperatur und nicht wie im Falle eines Klimaantriebs als direkte Einwirkung. In der Folge kommt es zu einer zusätzlichen Temperaturerhöhung durch die stärkere Einstrahlung. Theoretisch kommen auch andere Auslöser als die Temperatur infrage. Der hauptsächliche Faktor ist jedoch eine Temperaturveränderung, und unter der engeren Definition des IPCC sind Rückkopplungen eine Reaktion auf Temperaturänderungen. Die hauptsächlichen Rückkopplungsmechanismen sind:<sup>22</sup>

- **Wasserdampf**, welcher mit steigender Temperatur zunimmt, der wichtigste Rückkopplungsmechanismus und das Gas mit der größten Treibhauswirkung;

---

erhöhte CO<sub>2</sub>-Konzentration reagieren, nicht auf das sich verändernde Klima, wie es bei den Rückkopplungen der Fall ist. Dies sind jedoch Ausnahmen. IPCC AR4 WGI, 2.5.1 (S. 181), 2.5.8 (S. 185–186); IPCC TAR WGI, Appendix 6.1 (H) (S. 406).

21 Eingehend IPCC, AR5 WGI, 8.3–8.4 (S. 675–693). Für eine Liste der wichtigsten Klima- bzw. Strahlungsantriebe siehe IPCC, AR5 WGI, Table 8.6 (S. 696). Siehe auch Roedel, Wagner (2017), 10.2.2 (S. 549–553). Es werden manchmal neue Klimaantriebe identifiziert, und die Bedeutung und Stärke bereits bekannter Antriebe werden laufend untersucht und manchmal revidiert.

22 IPCC, AR5 WGI, 7.1.3 (S. 576–577), 8.7.1.4 (S. 713–714), 9.7.2 (S. 819–820); Charlson (2000), 17.4 (S. 450–456); Roedel, Wagner (2017), 10.2.3 (S. 553–561); Knutti, Rugenstein (2015), S. 1–6; Randall (2012), 5 (S. 140 ff.).

- der **Albedo-Effekt**, die Reflexion von Sonnenlicht, insbesondere durch Eisflächen;
- **Wolken**, durch Reflexion von Sonnenlicht und durch Isolation;
- die **Veränderung des vertikalen Temperaturgradienten** (*lapse rate*), also die mit zunehmender Höhe abnehmende Temperatur, was einen Einfluss auf die Abgabe von Wärme ins All hat;
- **Atmosphärenchemische und biogeochemische Rückkopplungsprozesse**, das heißt chemische Reaktionen in der Atmosphäre oder Wechselwirkungen zwischen der Atmosphäre und der Biosphäre, insbesondere im Zusammenhang mit dem Kohlenstoffkreislauf. Erwärmt sich die Erde und taut zum Beispiel als Konsequenz Permafrost und darunterliegendes organisches Material auf, führt dies zu einer zusätzlichen Freisetzung von Kohlendioxid und Methan. Umgekehrt kann eine moderate Erwärmung zu intensiverem Pflanzenwachstum und daher einer vermehrten Aufnahme von Kohlendioxid führen.

Grundsätzlich ist für die Unterscheidung zwischen Antrieb und Rückkopplung ausschlaggebend, ob eine interne Reaktion vorliegt oder nicht: Wird beispielsweise eine Veränderung der Reflexionswirkung der Erdoberfläche durch direkte menschliche Eingriffe verursacht, wie das Roden von Wäldern, ist das als Klima-antrieb einzustufen, erfolgt sie durch das Schmelzen von Eisflächen aufgrund erhöhter Temperaturen, ist es eine Rückkopplung. Die theoretische Trennung ist jedoch einerseits in der Praxis nicht immer einfach durchführbar und wird andererseits bei der Ermittlung des Strahlungsantriebs manchmal absichtlich durchbrochen, indem je nach Definition gewisse schnelle Rückkopplungen einbezogen werden, um eine größere Proportionalität des Strahlungsantriebs zur Temperaturänderung zu erhalten.<sup>23</sup> Die genaue Abgrenzung ist daher auch eine Definitionsfrage. Gewisse Prozesse können je nach Ursache oder Zeithorizont Strahlungsantrieb oder Rückkopplung sein. Kohlendioxid beispielsweise ist ein Strahlungsantrieb, wenn es durch die Nutzung fossiler Energieträger durch den Menschen emittiert wird, und eine Rückkopplung, wenn es aufgrund erhöhter

---

23 IPCC, AR5 WGI, 8.1.1.1 (S. 664): »Implicit in the concept of RF is the proposition that the change in net irradiance in response to the imposed forcing alone can be separated from all subsequent responses to the forcing. These are not in fact always clearly separable and thus some ambiguity exists in what may be considered a forcing versus what is part of the climate response.« Siehe auch IPCC, AR5 WGI, 8.1.2 (S. 668); 8.7.1.4 (S. 713) (für Emissionen); Roedel, Wagner, 10.2.1 (S. 545), 10.2.1.3 (S. 548), Abb. 10.9 (S. 546); Fuglestad et al. (2003), S. 285; Dessler (2016), 6.3.2 (S. 106) und unten, Kapitel 3.1.

Der Bedrohung der Erderwärmung steht das immense Wissen gegenüber, welches die Menschheit darüber besitzt. Ein gutes Verständnis der Zusammenhänge sollte aber nicht nur bei den Experten in Wissenschaft und Politik vorhanden sein – sondern auch bei den einzelnen Menschen als den Verursachern. Denn diese haben einen großen Spielraum, Treibhausgasemissionen im persönlichen Handlungsbereich zu reduzieren. Voraussetzung dafür ist eine eigene Überzeugung.

Stephan Buhofer erläutert die klimawissenschaftlichen Grundlagen, analysiert den Ausstoß von Treibhausgasen und untersucht die weltweiten Anstrengungen zu deren Reduktion. Im Sinne eines Leitfadens bietet das Buch einen umfassenden Einblick in die technischen Aspekte des Themas – für alle, die sich eingehend informieren möchten.