

Dreimal Treibhaus

Modelle und Modellierungen in Wissenschaft und Unterricht

Von Lutz Stäudel

KLASSENSTUFE: ab Klasse 10

THEMA: Treibhauseffekt

METHODE: Modellierungsaufgabe

Der Treibhauseffekt, der natürliche wie der anthropogene, entzieht sich der unmittelbaren Wahrnehmung. An ihm zeigt sich in prägnanter Weise, wie die Naturwissenschaften mit eben jenen „unsichtbaren“ Wirkungszusammenhängen umgehen, wie sie sie modellieren, zunächst sprachlich-begrifflich, dann im gedanklichen Modell mit Bezug zu Realobjekten und schließlich in aufwendigen mathematischen Modellierungen. Dieser kurze Beitrag will mit drei in Aufgaben gekleideten Teilthemen die Möglichkeiten aufzeigen, die für den Unterricht rund um den „Treibhauseffekt“ verknüpft sind. Die dabei verwendeten bzw. entwickelten Modelle und Modellierungen beziehen sich einerseits auf die Forderungen des Kompetenzbereichs „Erkenntnisgewinnung“, zum anderen sollen sie die Lernenden dabei unterstützen, die in Frage stehenden Zusammenhänge zwischen energieein-

intensiver Wirtschafts- und Lebensweise und Veränderungen der Umwelt besser zu verstehen und sie befähigen, sich aktiv und kompetent in die anstehenden Zukunftsentscheidungen einzumischen.

Im Zentrum der **ersten Aufgabe** steht ein Text von Svante Arrhenius. In einem Artikel von 1896 fasst er die damals bekannten Vorstellungen und Fakten zur Erwärmung der Atmosphäre zusammen [1] (s. auch S. 39 ff. in diesem Heft). Zugleich erlaubt er einen genauen Blick auf Wissenschaft im Werden. Dabei sind Ähnlichkeiten zur aktuellen Debatte um den Realitätsgehalt von Modellierungen durchaus erkennbar – und können qua historischer Distanz helfen, die gegenwärtige Situation eher als Normalfall (von Entwicklung) zu begreifen statt als vermeintliches Unvermögen, eindeutige Urteile abzugeben.

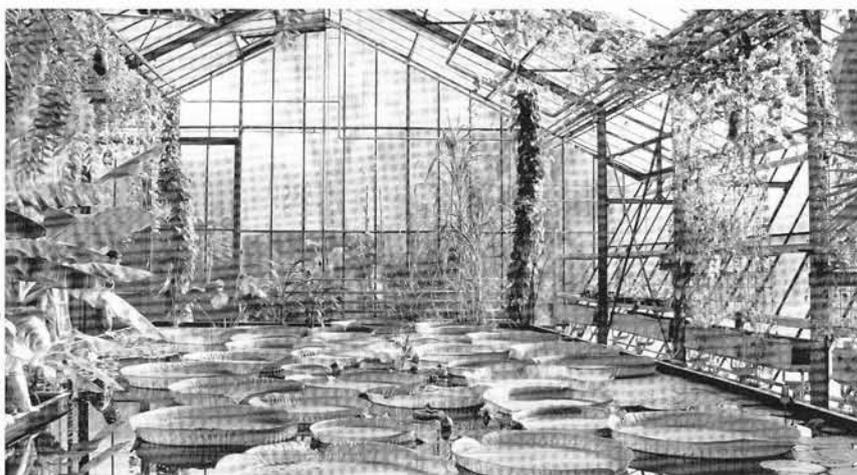
Im Kern der Aufgabe geht es darum, den englischen Text zunächst einmal zu übersetzen bzw. zu entschlüsseln. Dabei taucht früh der Begriff „hothouse“ auf, zu Arrhenius' Zeiten ein vergleichsweise populärer Begriff, da an vielen Stellen in Europa Gewächshäuser aus Eisen und Glas gebaut wurden, um die Beispiele exotischer Flora und Fauna zu studie-

ren und sich an ihnen zu erfreuen (vgl. **Abb. 1**). Tatsächlich stellt die Benutzung dieses Begriffs hothouse/greenhouse/Treibhaus den ersten Schritt einer Modellierung dar, der uns bis heute erhalten geblieben ist. Konkret fordert die Aufgabe dann weiter, ein möglichst einfaches und anschauliches Modell für den von Arrhenius diskutierten Sachverhalt zu entwickeln.

Die Aufgabe kann in mehrfacher Weise variiert und den Lernbedingungen der Gruppe angepasst werden. Für den fremdsprachlichen Teil der Aufgabe kann ein mehr oder weniger umfangreiches Vokabelglossar beigelegt werden, im Zweifelsfall auch eine Übersetzung ins Deutsche. Auch kann der Text durch geeignete (weitere) Kürzungen vereinfacht werden. Oberstufen-Lerngruppen könnten umgekehrt mit dem gesamten 34-seitigen Text konfrontiert werden, der im Internet frei verfügbar ist (vgl. [1]).

Als Ergebnis wird die Gegenüberstellung eines abgeschlossenen Luftvolumens (Kolben, Einmachglas, Plastiktüte) mit einem offenen Gefäß (oder gar keinem) erwartet und die Kontrolle der Temperaturentwicklung bei Sonneneinstrahlung oder unter künstlichem Licht (vgl. [1, 2]). In Fortführung bieten sich Untersuchungen mit Treibhaus-aktiven Gasen an, wie sie in diesem Heft von Sieve vorgeschlagen werden (s. S. 49f. in diesem Heft).

Bei der **zweiten Aufgabe** geht es um die Veranschaulichung der Energieaufnahme durch Treibhausgase. Bekanntlich sind die 3- und mehratomigen Moleküle in besonderer Weise in der Lage, langwellige Strahlung zu absorbieren und so in Bewegungsenergie umzusetzen, die auf der makroskopischen Ebene als Wärme sinnlich erfassbar wird. Die Aufgabe fordert die Schüler auf, aus Knetmasse und kleinen Spiralfedern, wie sie in Kugelschreibern Verwendung finden, Molekülmodelle zu bauen und daran die



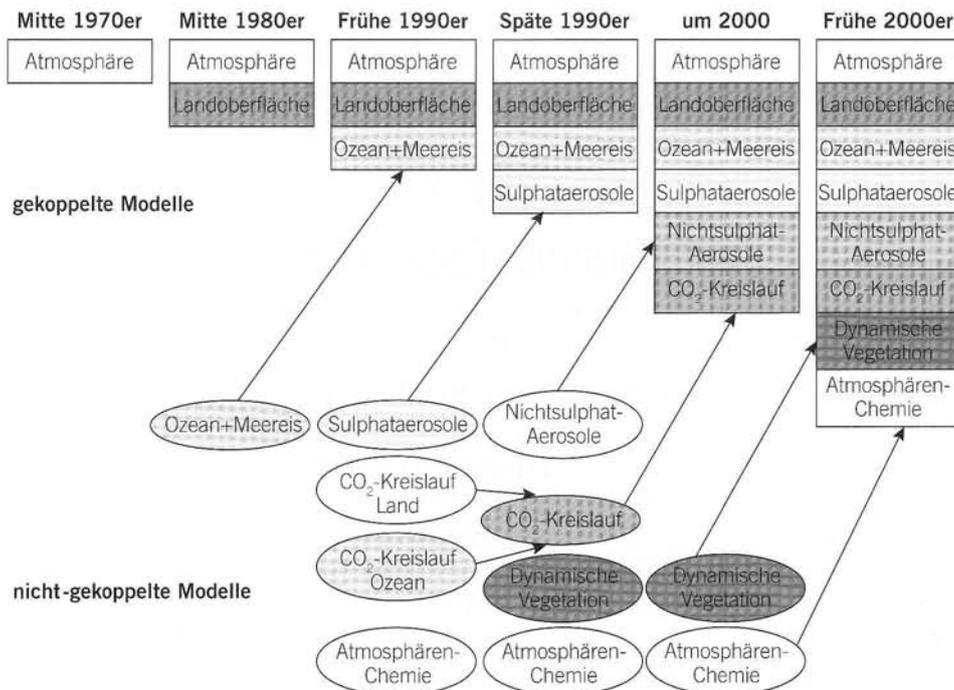
1 | Gewächshäuser aus Eisen und Glas sind an vielen Stellen Europas gebaut worden.

Möglichkeiten zur innermolekularen Bewegung zu studieren. An den Modellen können sie erfahren, dass es neben den Möglichkeiten der Translation, also der Bewegung in den drei Richtungen des Raums, in Abhängigkeit der Molekülgröße weitere Arten der Energieaufnahme gibt, insbesondere intramolekulare Schwingungen. Als Vorwissen notwendig sind elementare Vorstellungen von Wärme als Teilchenbewegung, wie sie im naturwissenschaftlichen Unterricht meist frühzeitig – etwa im Kontext der Übergänge zwischen den Aggregatzuständen – erarbeitet werden.

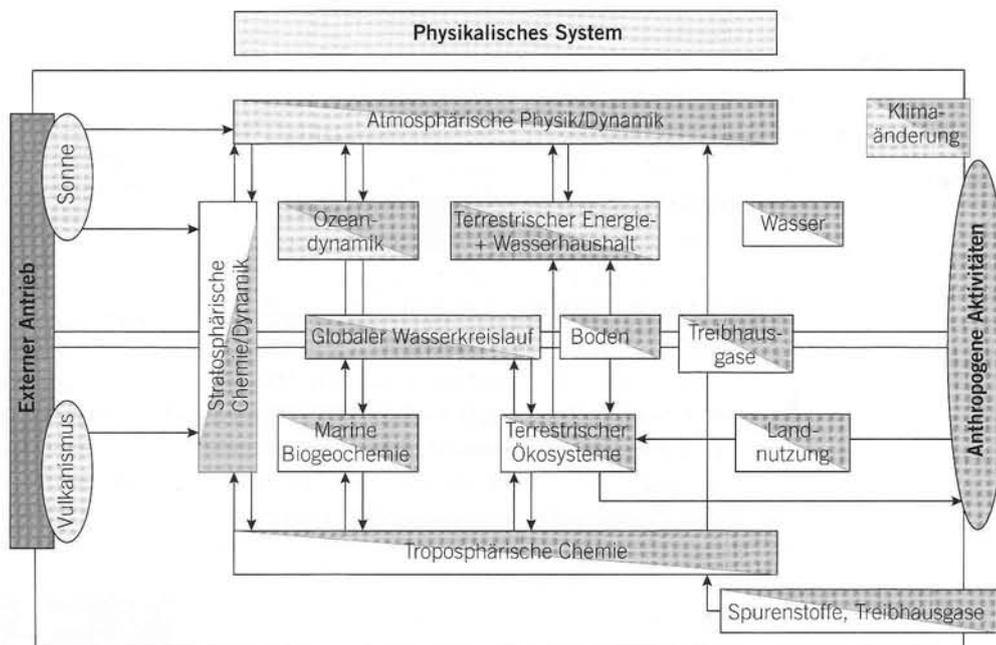
Je nach Jahrgangsstufe kann die Arbeit mit den fertigen Modellen weiter vertieft werden. So kann z. B. die Zahl der Freiheitsgrade der Bewegung am Modell bestimmt werden, wenn man die voneinander unabhängigen und die „entarteten“ Möglichkeiten bestimmt. Als „entartet“ werden bekanntlich jene Bewegungen bezeichnet, die sich durch Symmetrioperationen ineinander überführen lassen. Auf diese Weise können Schüler der Kursstufe etwa an ein Verständnis der allgemeinen Formel für die Berechnung der Freiheitsgrade herangeführt werden $FG = 3N - 6$ (für lineare Moleküle) bzw. $FG = 3N - 5$ (für gewinkelte Moleküle).

Allerdings thematisiert diese Aufgabe nur einen Teilaspekt der Absorption von Strahlung. Der Grad des Treibhauspotentials hängt u. a. auch von den Atomsorten im Molekül ab: Je größer die beteiligten Massen, desto weiter verschieben sich die Absorptionsbanden in den langwelligen Bereich und desto leichter wird die Anregung von intramolekularen Schwingungen. Wichtiger ist im Anschluss an die Bearbeitung der Aufgabe jedoch das Eingehen auf den Zusammenhang der verschiedenen – intra- und zwischenmolekularen – Bewegungsarten: Bei Teilchenstößen mit mehratomigen Molekülen wird stets ein Teil der Schwingungs- bzw. Rotationsenergie in Translationsenergie umgewandelt; mit der so steigenden mittleren Geschwindigkeit der Teilchen steigt entsprechend die Temperatur des Gasgemisches.

Vor diesem Hintergrund kann den Lernenden verständlich werden, warum einige Spurengase ein deutlich höheres Treibhauspotential besitzen als Wasser-



2 | Beispiel für ein aktuell verwendetes Klimamodell (<http://wiki.bildungsserver.de/klimawandel/upload/thumb/Modellentwicklung.jpg/500px-Modellentwicklung.jpg>)



3 | Weiteres Beispiel für ein aktuell verwendetes Klimamodell (Quelle: Dieter Kasang: Komplexe Klimamodelle. Download von „Klimanavigator“) <http://www.klimanavigator.de/dossier/artikel/012808/index.php>

dampf oder Kohlenstoffdioxid. (**Hinweis:** Einfache Kugelschreiber, aus denen man die Federn entnehmen kann, erhält man im Werbefachhandel/Internet ab 7 € für 100 Stück; alternativ lässt man Stücke von Blumendraht um Nägel wickeln, die so selbst hergestellten Spiralen sind für die Modellbetrachtungen gut geeignet.) Die **dritte Aufgabe** thematisiert die inzwischen zu hoher Komplexität entwickelten Modellierungen von möglichen bzw.

zu erwartenden Klimaveränderungen (vgl. S. 2 ff. in diesem Heft). Dazu wird ein einfaches Schema benutzt, das verstärkende und abschwächende Einflüsse eines Faktors auf eine Zielgröße durch Beziehungspfeile, versehen mit „+“ oder „-“, verwendet. Die Schülerinnen und Schüler sollen dieses Schema sukzessive anhand eines Textes, der in knapper Form die Entwicklung mathematischer Klimamodelle beschreibt, ausdifferenzieren.

Das „Hothouse“ als Modell für die Atmosphäre

THE
LONDON, EDINBURGH, AND DUBLIN
PHILOSOPHICAL MAGAZINE
AND
JOURNAL OF SCIENCE
[FIFTH SERIES]

APRIL 1896

XXXI. On the Influence of Carbonic Acid in the Air upon the Temperature of the Ground.
By Prof. Svante Arrhenius

I. Introduction: Observations of Langley on Atmospheric Absorption.

A GREAT deal has been written on the influence of the absorption of the atmosphere upon the climate. Tyndall in particular has pointed out the enormous importance of this question. To him it was chiefly the diurnal annual variations of the temperature that were lessened by this circumstance. Another side of the question, that has long attracted the attention of physicists, is this: Is the mean temperature of the ground in any way influenced by the presence of heat-absorbing gases in the atmosphere? Fourier maintained that the atmosphere acts like the glass of a hothouse, because it lets through the light rays of the sun but retains the dark rays from the ground. This idea was elaborated by Pouillet; and Langley was by some of his researches led to the view, that „the temperature of the earth under direct sunshine, even though our atmosphere were present as now, would probably fall to -200°C , if that atmosphere did not possess the quality of selective absorption“. This view, which was founded on too wide a use of Newton's law of cooling, must be abandoned, as Langley himself in a later memoir showed that the full moon, which certainly does not possess any sensible heat-absorbing atmosphere, has a „mean effective temperature“ of about 45°C . The air retains heat (light or dark) in two different ways. On the one hand, the heat suffers a selective diffusion on its passage through the air; on the other hand, some of the atmospheric gases absorb considerable quantities of heat. These two actions are very different. The selective diffusion is extraordinarily great for the ultra-violet rays, and diminishes continuously with increasing wavelength of the light, so that it is insensible for the rays that form the chief part of the radiation from a body of the mean temperature of the earth.

Der Chemiker und Naturforscher Svante Arrhenius (1859–1927) fasste vor mehr als 100 Jahren in einem Artikel zusammen, was man um 1900 vom Treibhauseffekt wusste. Der Anfang des Artikels in einem bedeutenden englischen Wissenschaftsmagazin ist hier wiedergegeben.



© wikimedia.org

Eure Aufgaben:

- Übersetzt den Text sinngemäß, so gut ihr es könnt. Notiert Vokabeln, die ihr nicht kennt und schlagt sie nach.
Beachtet, dass viele Namen von Personen vorkommen, auf deren Forschungen Arrhenius Bezug nimmt.
- In einem zentralen Satz vergleicht Arrhenius die Atmosphäre mit einem ‚hothouse‘.
Was genau meint er damit? Wieso kann man sagen, er benutzt das ‚hothouse‘ als Modell für die Atmosphäre?
- Arrhenius beschreibt die Vorgänge im ‚hothouse‘ noch genauer, insbesondere die Wärmeaufnahme.
Wie nennen wir heute, was er als ‚light rays‘ bzw. als ‚dark rays‘ bezeichnet?
Wo kommen nach Arrhenius die ‚dark rays‘ her? Wie könnt ihr seine Aussage mit heute üblichen Begriffen formulieren?
- Entwerft selbst ein ‚hothouse‘ mit einfachsten (Haushalts-)Geräten und testet es.
Was könnt ihr daran untersuchen? Wie könntet ihr den Anteil der ‚dark rays‘ optimieren?
- Erörtert mit eurem Nachbarn die Reichweite des entwickelten Modells.
Was zeigt es, was zeigt es nicht?
Wo in eurem Leben gibt es Phänomene, die einem solchen ‚hothouse‘ ähnlich sind?



Ein einfaches „Mini-Treibhaus“

Bewegungsmöglichkeiten der Moleküle eines Treibhausgases

Ihr wisst: Durch Wärme werden Teilchen in Bewegung gesetzt. Wie der Begriff Treibhausgas bereits sagt, gibt es offenbar Gasteilchen, die besser als andere Wärme „aufnehmen“ und „speichern“ können. Um herauszufinden, warum dies so ist, sollt ihr mit den bereitliegenden Materialien (Knetmasse, kleine Spiralfedern) eine Reihe von Gas-Molekülen im Modell nachbauen:

- Ein Sauerstoff- bzw. Stickstoffmolekül
- Ein Kohlenstoffdioxid-Molekül
- Ein Methan-Molekül
- Ein weiteres Molekül eines Gases, das als besonders treibhausaktiv gilt (s. **Tab. 1**)

	Aktivität
Kohlendioxid	CO ₂ : 1
Methan	CH ₄ : 23
F11	CFCl ₃ : 3500
F12	CF ₂ Cl ₂ : 7300
Lachgas	N ₂ O : 290
Ozon	O ₃ : 2000

Tab. 1 | Treibhauspotenzial im Vergleich zu CO₂

Euer Untersuchungsauftrag: Überprüft die folgenden Aussagen an den nachgebauten Modellen:

- Einatomige Gasteilchen können sich nur in die drei Richtungen des Raums bewegen.
- Zweiatomige Moleküle können darüber hinaus rotieren, und zwar um die Längsachse und senkrecht dazu, außerdem können die Atome im Molekül hin- und herschwingen und dabei ihren Abstand verändern.

Findet heraus, in welche Richtungen sich dreiatomige Moleküle bewegen können!

- Versucht, so viele voneinander unabhängige Bewegungsmöglichkeiten wie möglich im Modell des CO₂-Moleküls und des von euch gewählten Treibhausgases zu identifizieren. Skizziert diese Bewegungen, damit ihr den Überblick behaltet.
- Prüft anschließend, ob die gefundenen Schwingungen wirklich voneinander unabhängig sind oder ob sie sich durch geeignetes Drehen des Molekülmodells ineinander überführen lassen.
- Wie viele Bewegungsmöglichkeiten ergeben sich für CO₂-Moleküle? Wie viele für die Moleküle eures anderen Treibhausgases?
- Wenn ihr fertig seid, vergleicht eure Ergebnisse mit den Animationen im Internet: <http://www.chemgapedia.de>. Sucht dort nach „Animation der Schwingungen eines dreiatomigen linearen Moleküls“

ren. Der Start geht von der bereits von Arrhenius gemachten Feststellung aus, dass eine Erhöhung des CO₂-Gehaltes in der Atmosphäre zu einer Erhöhung der (durchschnittlichen) Temperatur in Bodennähe führt (s. **Arbeitsblatt 3**)

Nicht fehlen darf hierbei die Erörterung, dass die Wirkungsmechanismen keineswegs linear sind, wie es die Verwendung von Pfeil und Plus- oder Minus-Zeichen womöglich suggerieren. Vielmehr handelt es sich um komplexe Funktionen, die oft einem Maximalwert zustreben, teilweise selbstverstärkende Effekte produzieren und zudem von dritten Faktoren abhängig sein können.

Die Ergebnisse der Lerngruppen können im Plenum verglichen und diskutiert werden. Interessant ist daran anschließend die Rezeption der Beschreibung aktuell verwendeter Klimamodelle (vgl. **Abb. 2 und 3**), die heute in der Regel aus mehreren gekoppelten Teilmodellierungen bestehen.

Die eigene Konstruktion des einfachen Modells soll zum einen dazu beitragen zu verstehen, dass Modellierungen

dieser Komplexität niemals abgeschlossen sind, sondern immer weiter differenzierbar, dass ihr „Wahrheitsgehalt“ sich schließlich an der Übereinstimmung von Vorhersage mit der Entwicklung messbarer Größen erweisen muss, zum anderen sollen so die formale Beschreibung von Modellierungen wie die des Potsdamer Instituts für Klimafolgenforschung erschließbar gemacht werden. Dass man übrigens auch Klima-Modellierungen im mathematischen Sinn mit Schülern der Oberstufe realisieren kann, hat T. Bell in einem Beitrag in „Unterricht Physik“ gezeigt [4].

Schlussbemerkungen

Modelle, Modellierungen – tatsächlich ist der „Treibhauseffekt“ ein in dieser Hinsicht ergiebiges Thema. Nicht vergessen werden darf dabei aber wie auch sonst im naturwissenschaftlichen Unterricht, dass Kompetenzerwerb kein Selbstzweck ist, sondern stets gerichtet auf Urteilsbildung und möglichst aktive

Teilhabe im Alltag. Wenn es gelingt, die Schülerinnen und Schüler dies erfahren zu lassen, werden sie sich gewiss auch einlassen auf den nicht immer einfachen Umgang mit dem, was dem Auge unzugänglich ist, und Modelle als eines der möglichen Werkzeuge zu deren Erschließung verstehen.

Literatur

- [1] Arrhenius, S.: On the Influence of Carbonic Acid in the Air upon the Temperature of the Ground. In: The London Edinburgh and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science [Fifth Series] April 1896, S. 237–276
Download: http://www.rsc.org/images/Arrhenius1896_tcm18-173546.pdf oder: <http://www.math.umn.edu/~mcgehee/Seminars/ClimateChange/references/Arrhenius1896-ocr.pdf>
- [2] vgl. die Vorschläge im Themenheft „Klimawandel“ der Zeitschrift Unterricht Physik, Nr. 111/112 (2009), insbes. S. 65 ff.
- [3] WWF Deutschland (Hrsg.): Lufthülle aus dem Gleichgewicht. (o. O.) 1993, S. 49 f; download: http://www.staedel.de/schriften_LS/088%20Lufthuelle_wwfOzon.pdf
- [4] Th. Bell: Das Klima modellieren – (k)ein Thema für den Unterricht? In: U Phy H. 111/112 (2009), S. 55–60

Klimawandel als Regelkreismodell

Naturforscher wie Svante Arrhenius kamen bereits um 1900 zu der begründeten Vermutung, dass „die Temperatur in den arktischen Regionen um ungefähr 8 bis 9 Grad Celsius steigen könnte, wenn der Gehalt des Kohlenstoffdioxids in der Atmosphäre um das 2,5 bis 3-fache steigt“. Wir wissen heute, dass mehr Faktoren an der Klimaveränderung beteiligt sind als nur das CO₂.

Eure Aufgabe

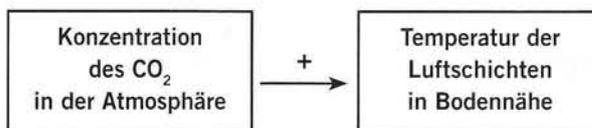
- Ihr sollt ein Schema zur Klimaveränderung entwerfen, das verstärkende und abschwächende Einflüsse eines Faktors auf eine Zielgröße durch Beziehungspfeile verdeutlicht.
Ein Pfeil Pluszeichen bedeutet dabei „Faktor hat verstärkenden Einfluss auf ...“.
Ein Pfeil mit Minuszeichen bedeutet entsprechend „Faktor hat abschwächenden Einfluss auf ...“.
- Die Feststellung von Arrhenius „Erhöhung des CO₂-Gehaltes in der Atmosphäre führt zu Erhöhung der Luftschichten in Bodennähe“ kann der Start einer Modellierung sein.
- Ihr sollt anhand des folgenden Textes, der die immer weiter getriebene Verfeinerung der Klimamodelle beschreibt, dieses Modell entsprechend erweitern, ganz so wie die Computermodelle erweitert worden sind.

In diesen Schritten könnt ihr vorgehen:

- Verschafft euch einen ersten Eindruck vom Inhalt des Textes.
- Macht eine Liste der Faktoren, die nach und nach in die Klimamodelle einbezogen worden sind.
- Überlegt euch, mit welchen anderen Faktoren sie in Wechselwirkung stehen; wie sieht diese Wechselwirkung aus?
- Schreibt jeden Faktor auf ein Kärtchen und ordnet alle Faktoren auf einem Plakatkarton so an, dass sinnvoll Pfeile gezeichnet werden können.

Wenn ihr fertig seid, stellt folgende Überlegungen an:

- Wie kann man testen, ob ein solches Modell mit der Wirklichkeit übereinstimmt?
- Wie lautet eine Frage, die mit einem solchen Modell beantwortet werden soll?



Der verstärkende Einfluss des Faktors CO₂-Konzentration wird verdeutlicht: Eine Erhöhung des CO₂-Gehalts in der Atmosphäre führt auch zu einer Erhöhung der Temperatur in Bodennähe.

„Die ersten mathematischen Formeln zur Beschreibung der Atmosphäre wurden 1904 vom norwegischen Physiker Vilhelm Bjerknes veröffentlicht und beschränkten sich auf die Vorhersage des Wetters. Das erste Klimamodell, ein mathematisches Modell zur Beschreibung der atmosphärischen Zirkulation, wurde 1956 vom Amerikaner Norman Phillips veröffentlicht. Eine bedeutende frühe Anwendung von Klimamodellen war 1967 die Simulation des Zusammenhangs von steigenden Treibhausgasgehalten auf die Klimaerwärmung.“

Durch die Fortschritte bei der Computertechnik erlangten Modelle der klimatischen Zirkulation seit den 1970ern immer größere Bedeutung. Mit steigender Rechnerleistung in den 1980ern wurden Klimamodelle um Wechselwirkungen zwischen Atmosphäre und Erdoberfläche erweitert. In den 1990ern kamen Einflüsse von Ozeanen, Meereisbedeckung und Schwebeteilchen in der Luft hinzu. Mit den jüngsten Weiterentwicklungen wurden klimarelevante Auswirkungen von Kohlenstoff- und Nährstoffkreisläufen, des Pflanzenwachstums und luftchemischer Prozesse eingeführt.

Aktuell arbeiten Wissenschaftler daran, feinere zeitliche und räumliche Berechnungsschritte zu programmieren und die Realitätsnähe von Klimamodellen durch die Simulation von Wolkenbildung und gegenseitiger Beeinflussung von Atmosphäre und Ökosystemen zu verbessern. Obwohl auch die komplexesten Klimamodelle noch immer stark vereinfachte Abbilder der Realität sind und ihre Berechnungen erheblichen Unsicherheiten unterliegen, haben sie maßgeblich dazu beigetragen, die komplexen Prozesse des Klimageschehens und ihre Wechselwirkungen besser zu verstehen.“

Quelle: Bayerisches Landesamt für Umwelt (Hrsg.): UmweltWissen – Erforschung und Vorhersage des Klimawandels. München 2008 http://www.lfu.bayern.de/umweltwissen/doc/uw_80_klimawandel_forschung_vorhersage.pdf