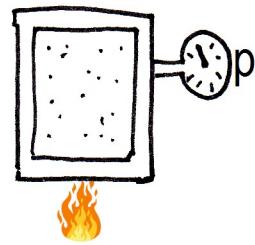


2. Wiederum Gas mit $T_0 = 300 \text{ K}$ (27°C) und Erhitzung auf $T_1 = 600 \text{ K}$ (327°C). Wir geben ihm diesmal keine Möglichkeit zum Ausdehnen.
 ⇒ Der Druck steigt aufs Doppelte an.¹

Allgemein²:
$$\frac{p_1}{p_0} = \frac{T_1}{T_0}$$

Begründung: siehe oben.³



Bsp. a zu 1. Nach längerem Lüften haben die 20 m^3 Luft in einem Raum 280 K (7°C). Sie wird dann auf 293 K (20°C) aufgeheizt. Wie stark steigt ihr Volumen?

$$V_1 = V_0 \cdot \frac{T_1}{T_0} = 20 \cdot \frac{293}{280} = 20,929 \text{ m}^3 = 20.929 \text{ l}$$

Da p kaum ansteigt, entweichen 929 l Luft z.B. durch Türritzen.
 (Wird beim „Passivhaus“ verhindert!⁴)

Bsp. b zu 1. Ein Heißluftballon (1000 m^3) wird mit Luft mit einer Temperatur von 330 K (57°C) vollständig gefüllt. Die Luft kühlt bald auf 323 K (50°C) ab. Wie viel Luft wird nachströmen?

$$V_1 = V_0 \cdot \frac{T_1}{T_0} = 1000 \cdot \frac{323}{330} = 978,8 \text{ m}^3, \text{ also um ca. } 21 \text{ m}^3$$

Bsp. zu 2. In einem „Heißluftmotor“⁵ wird Luft von 400 K (= 127°C) auf 600 K (= 327°C) aufgeheizt. Wie stark steigt der Druck? $p_0 = 1 \text{ bar}$

$$p_1 = p_0 \cdot \frac{T_1}{T_0} = 100.000 \cdot \frac{600}{400} = 150.000 \text{ Pa} \Rightarrow \text{Druck steigt auf } 1,5 \text{ bar.}$$

¹ Einfacher Versuch zu Selbstmachen: Nimm eine Glasflasche und verschließe sie dicht. Stelle sie in ein warmes Wasserbad und warte, bis sich die Luft in der Flasche erhitzt. Wenn du den Deckel aufmachst, bemerkst du, dass der Druck angestiegen ist. Umgekehrt: Wenn man Marmelade abfüllt, ist die Luft unterhalb des Deckels heiß. Diese kühlte dann aus, wodurch der Druck sinkt. Der äußere Luftdruck ist also dann größer als der Druck im Glas, was den Deckel gut schließen lässt und ihn auch ein wenig hineindrückt. Deswegen knackt es beim Öffnen.

Es gilt wieder eine einfache Proportionalität: Je höher die Temperatur, desto größer ist der Druck. Oder: Z.B. 10% mehr Temperatur ergibt 10% mehr Druck. Aber nur, wenn man T in Kelvin einsetzt!

² Gesetz von Amontons (sprich ungefähr: „Amonton“ franz. Physiker) oder auch 2. Gesetz von Gay-Lussac. Schau dir auch den Versuch auf [youtube.com/watch?v=1pVVZGOBIVg](https://www.youtube.com/watch?v=1pVVZGOBIVg) an. Die Einheit mm Quecksilber (Hg) ist freilich etwas veraltet. ($750 \text{ mm Hg} = 1 \text{ bar}$)

³ Wir wissen, die Temperatur in Kelvin ist proportional zur kinetischen (=Bewegungs-)Energie der Teilchen ($=mv^2/2$), also zu v^2 . Das Folgende, für die, die es genau wissen wollen: v steigt also bei Verdopplung von T nur auf das $\sqrt{2}$ -fache (v^2 auf das doppelte). Die Häufigkeit des Auftreffens an den Wänden steigt aber um denselben Faktor, sodass sich wieder $\sqrt{2}^2 = 2$, also eine Verdopplung des Drucks ergibt.

⁴ Ein Passivhaus ist ein Haus ohne konventionelle Heizanlage, das extrem gut gedämmmt ist. Damit die Energie in der warmen Luft, die durch diese Ausdehnung oder durch notwendiges Lüften entweichen muss, nicht verloren geht, wird eine „kontrollierte Wohnraumbelüftung“ eingebaut: Die zuströmende Frischluft wird in einem sogenannten Wärmetauscher von der warmen Abluft aufgewärmt (und die Abluft damit abgekühlt).

⁵ Also soetwas: [youtube.com/watch?v=SpJOJIdyyQ](https://www.youtube.com/watch?v=SpJOJIdyyQ) (Schau in der Mitte kurz rein.)

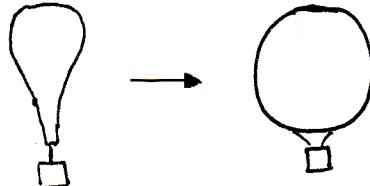
Man sieht hier die Bedeutung der Kelvinskala.

Letztlich wurde sie übrigens genau auf diesem Wege entdeckt.⁶

Bsp. zu 3:⁷ Ein $0,8 \text{ m}^3$ fassender He-Ballon⁸ z.B. wird bei $p_0 = 1 \text{ bar}$ mit $0,1 \text{ m}^3$ He gefüllt. Der Außen-(und Innen-)druck sinkt auf $0,25 \text{ bar}$ und die Temperatur des Heliums wird konstant gehalten.

Der Druck sinkt auf $\frac{1}{4}$ \Rightarrow Volumen steigt auf das 4fache, also $0,4 \text{ m}^3$.

Bei $0,125 \text{ bar}$ ist er mit $0,8 \text{ m}^3$ prallvoll.



3. Allgemein:⁹
$$\frac{V_1}{V_0} = \frac{p_0}{p_1}$$

Alle drei Gesetze in einer Formel:
$$\frac{p_0 V_0}{T_0} = \frac{p_1 V_1}{T_1}$$

Anm.: Der weitere Stoff kann auch ausgedruckt werden, soll aber bitte im Voraus gelesen werden.

⁶ Im 18./19. Jh. war man weit davon entfernt, in die Nähe des absoluten Nullpunkts bei -273°C zu kommen. Also: Die Methode „So lange abkühlen, bis es nicht mehr weiter geht“ ging nicht. Man merkte nur, dass das Verhalten von Gasen diese einfachen Formeln / Proportionalitäten ergibt, wenn man den Nullpunkt bei -273°C ansetzt. Z.B. geht es nicht zu sagen: 100°C ergibt das doppelte Volumen wie 50°C , aber mit der Kelvinskala geht es: Siehe Punkt 1.

Pass also auf: In diesem Unterabschnitt darfst du nur mit K rechnen. Beim Rechnen mit $^\circ\text{C}$ kommen völlig falsche Ergebnisse heraus.

⁷ Die Formel für Punkt 3 folgt gleich noch. Wir beginnen mit einem Bsp.

Würde man den Ballon auf 11 bzw. 16,5 km – dort herrscht der entsprechende Luftdruck von 1/4 bzw. 1/8 bar – steigen lassen, würde die Temperatur jedenfalls stark sinken:

a) wegen der adiabatischen Ausdehnung (siehe nächstes Kapitel) und

b) wegen der tiefen Außentemperatur nahe der Tropopause (Grenze Troposphäre zur Stratosphäre [Troposphäre = unterste Luftsicht, Stratosphäre = darüber liegende Luftsicht, Grenze bei $\sim 10 \text{ km}$ Höhe, d.h. selbst der Mount Everest (8848m) und fast alle Wolken liegen vollständig in der Troposphäre.]) Die Temperatur sinkt bis zur Tropopause auf unter -50°C , dann steigt sie wieder an. Man müsste also den Ballon heizen, damit die Temperatur konstant bleibt.

Bei Interesse 1:58-2:36 von [youtube.com/watch?v=VV6GhnDaCrY](https://www.youtube.com/watch?v=VV6GhnDaCrY) ansehen.

⁸ Warum Helium? Helium hat eine Dichte von ca. $0,18 \text{ kg/m}^3$, Luft von $1,3 \text{ kg/m}^3$. Es erfährt in Luft also einen starken Auftrieb. Leichter ist nur Wasserstoff (H_2). Dieser ist aber brennbar und soll nur für kleine Ballons eingesetzt werden, die nichts Teures transportieren.

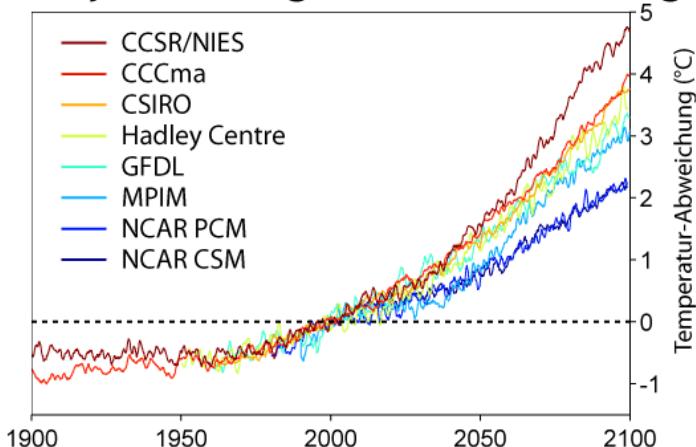
⁹ Boyle-Mariottesches Gesetz (sprich: Boil-Mariot). Zum dritten Mal haben wir eine einfache Proportionalität: Z.B. 50% mehr Druck ergibt 50% mehr Volumen (bei konstanter Temperatur). Versuch im Labor: [youtube.com/watch?v=3xHD8YNTyM](https://www.youtube.com/watch?v=3xHD8YNTyM) (wird im Unterricht vorgeführt – nur zum Nachsehen) oder im Tauchbecken: [youtube.com/watch?v=hPhY6MZCv5U](https://www.youtube.com/watch?v=hPhY6MZCv5U). Die Temperatur der Luft wird konstant gehalten: Beim ersten Video durch die dicke Glasröhre, beim zweiten durch das Wasser im Becken. Beachte, dass die linke Flasche zum Vergleich mit Wasser gefüllt ist. Dieses verändert sein Volumen durch den Wasserdruck, der mit der Tiefe steigt, praktisch nicht.

Eine gute Erklärung findest du im Video [youtube.com/watch?v=f7f24DtTIKQ](https://www.youtube.com/watch?v=f7f24DtTIKQ) bis 2:13. Schalte den Untertitel ein. Dazu schon jetzt eine Anmerkung: Wir werden im nächsten Kapitel sehen, dass eine plötzliche Reduktion des Volumens bewirkt, dass sich das Gas erhitzt. Man muss also das Volumen also so langsam reduzieren, dass das Gas die Temperatur der Wände behalten kann (also Wärmeenergie an diese abführt).

KLIMAWANDEL

Mechanismus: Mehr CO₂, CH₄¹⁰ u.a. bewirken durch Absorption eine verringerte Rückstrahlung von Wärmestrahlung in den Weltraum und damit eine Erwärmung → verstärkter Treibhauseffekt¹¹
verschiedene Szenarien¹²:

Projektionen globaler Erwärmung



- schneller Ausstieg aus Kohle, Erdöl etc., geringeres Bevölkerungswachstum: + 1 ... 3°C bis 2100
- „business as usual“: +2 ... 6°C bis 2100

+2°C weitgehend OK, man hofft auf Stabilität

+6°C: irreversible Kippeffekte (z.B. Abtauen von Grönland, Permafrostböden u.v.m.) wahrscheinlicher, die u.U. zu einem Supertreibhaus führen können.¹³

schon da: Arktis schmilzt im Sommer, Alpengletscher verloren
(selbstverstärkend: dunkles Wassers bzw. schmutziges Eis)¹⁴
möglich: Grönland -1% Eis → +10cm Meeresspiegel

Auftauen Permafrost (CH₄-Emission: selbst verstärkend)¹⁵

unwahrscheinlich: Schmelzen der Antarktis (zu kalt¹⁶, voraussichtlich mehr Niederschlag dort)

→ gerade keine Panikmacherei¹⁷!

¹⁰ Kohlen(stoff)dioxid, Methan

¹¹ Ich erkläre den Mechanismus hier nicht genauer, weil wir Wärmestrahlung noch nicht gelernt haben. Folgende Erklärvideos sind gut und enthalten keine groben Fehler: [youtube.com/watch?v=Ds4HxRif8dA](https://www.youtube.com/watch?v=Ds4HxRif8dA) und [youtube.com/watch?v=eI8L3wV3pBo](https://www.youtube.com/watch?v=eI8L3wV3pBo). Bitte nicht selbst im Internet recherchieren! Zu diesem Thema gibt es auf der einen Seite die Horrorszenarien und auf der anderen Seite die Verharmloser / Leugner. Ich habe in Umwelphysik mein Doktorat gemacht und kann euch deswegen das Seriose heraussuchen.

¹² aus de.wikipedia.org/wiki/Globale_Erw%C3%A4rmung

¹³ Wenn also die Erwärmung zu automatischem Ansteigen der Emissionen führt, wird es wirklich gefährlich. Die Wissenschaftler sind sich einig, dass das unbedingt vermieden werden muss.

¹⁴ Weißes Eis reflektiert das Sonnenlicht gut, wird also von der Sonne wenig aufgewärmt. Je dunkler eine Oberfläche, desto mehr Sonnenlicht wird absorbiert (aufgenommen) und der Gegenstand erwärmt sich. Das kannst du selbst ausprobieren. Trage helle oder dunkle Kleidung und setze dich in die Sonne.

¹⁵ In Permafrostböden, z.B. im Sibirien, ist Methan (CH₄) gespeichert. Wenn diese auftauen, setzen sie dieses frei, was zu weiterer Erwärmung führt.

¹⁶ Wenn es z.B. bei -30°C um 5°C wärmer wird, so hat es immer noch -25°C.

¹⁷ Das ist alles wissenschaftlich gut untersucht. Der Unsicherheitsfaktor in den Prognosen ist groß, aber das heißt nicht, dass sie nicht ernst zu nehmen sind.

Bisher wurden Verbesserungen praktisch immer überkompensiert:
z.B. sparsamere Autos, dafür mehr davon bei höherer km-Leistung
(1950: 1000 km/a, heute 12000 km/a)
Industrie (Schmutziges ausgelagert¹⁸)
Bevölkerungswachstum (v.a. aber immer mehr, die auf unserem Stand leben)¹⁹

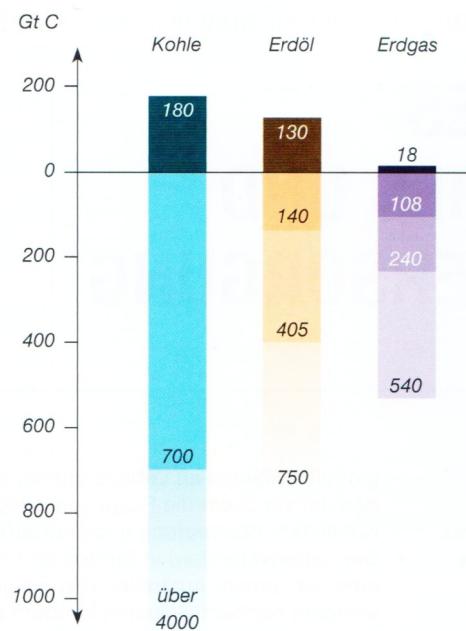
Aufnahme von CO₂ durch die Ozeane. Bei 400 ppm²⁰ (heute) nehmen sie mehr auf (vgl. Mineralwasser, aber umgekehrt).²¹ Würden wir 75% weniger emittieren, bliebe es dabei. Ozeane noch lange nicht „voll“ – transportieren es in kaltes Wasser der Tiefsee.

Bäume pflanzen: Baum stirbt wieder ab / verbrennt, also letztlich kein CO₂ beseitigt (evtl. Hausbau, Wiederaufforstung).²²

Kippeffekt: Warme Ozeane geben CO₂ wieder ab (vgl. warmes Mineralwasser)²³

Es ist noch zu viel fossiler C da.²⁴ →

v.a. Kohle: Stromerzeugung für Schwellenländer²⁵.



¹⁸ In Länder mit niedrigeren Umweltstandards (und Lohnniveau)

¹⁹ Es wäre kein Problem, wenn alle Menschen so leben würden wie der durchschnittliche Afrikaner. Wie wir können aber gar nicht alle Menschen leben, dafür sind ganz einfach die Ressourcen nicht da.

²⁰ 400 ppm (parts per million) = 400/1 000 000 = 0,0004 = 0,04% CO₂

²¹ Wasser kann Kohlendioxid aufnehmen, dann heißt es Kohlensäure. Das weiß jeder vom Mineralwasser. Die Ozeane nehmen 25% unserer Emissionen auf. Freilich versauern sie deswegen etwas, was für die Korallen ein Problem ist.

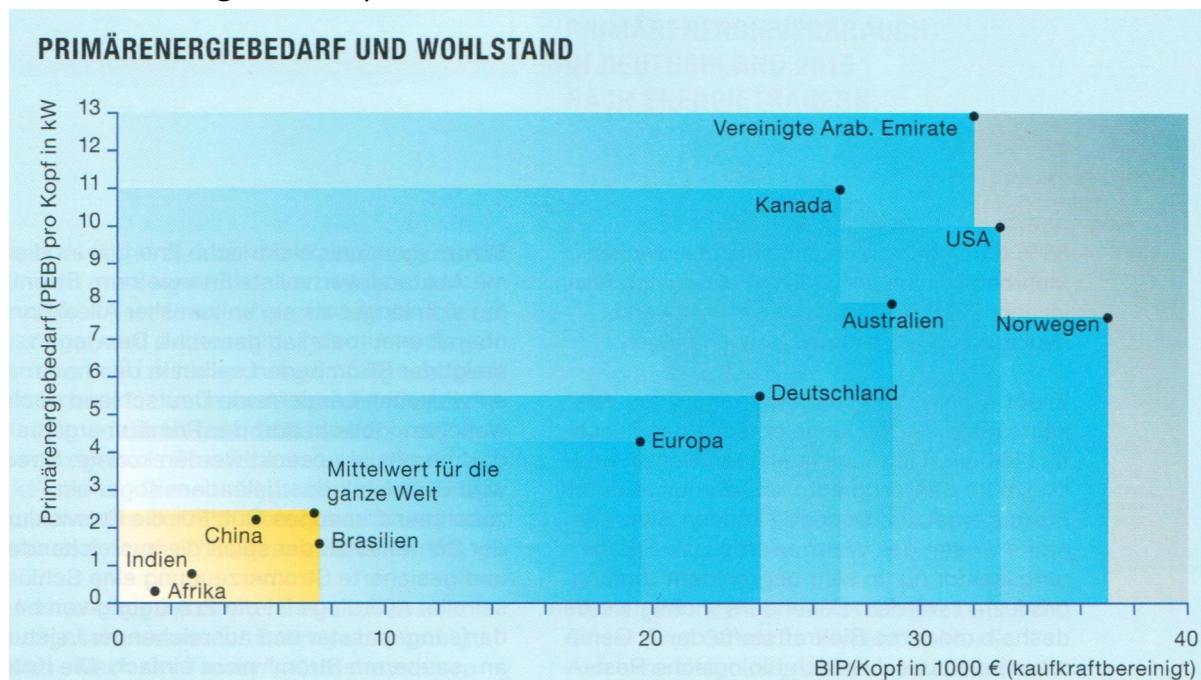
²² Wenn ich aus Holz ein Haus baue, das lange steht, ist darin Kohlenstoff gebunden. Ebenso in einem Wald, der auf einer Fläche steht, wo vorher keiner war. Ansonsten ist es ein Kreislauf: Holz wächst nach, anderes wird entnommen und verbrannt.

²³ Jeder weiß, dass warmes Mineralwasser seine Kohlensäure verloren hat. Das wäre bei warmen Ozeanen auch so. Dazu dürfen wir es auch nicht kommen lassen.

²⁴ aus Buchal und Schönwiese „Klima“ S. 163. Das schon Verbrauchte ist über der x-Achse, das noch Vorhandene unter der x-Achse eingezeichnet ist. Bsp. Erdgas: 108 Gt C (Gigatonnen Kohlenstoff) sind in Form von Erdgas sicher noch vorhanden. 240 bis 540 Gt sind vielleicht noch zusätzlich da. Verbraucht wurden aber erst 18 Gt.

²⁵ Also Länder, deren Industrialisierung beginnt.

Andere steigen im Wohlstand. (v.a. Indien und China – bevölkerungsreich!)²⁶



²⁶ Graphik aus Buchal und Schönwiese „Klima“ S. 165. Man sieht, dass derzeit noch ein starker Zusammenhang zwischen Bruttoinlandsprodukt (einem Maß für den Wohlstand) und dem Energieverbrauch herrscht: Je größer der Wohlstand, desto größer der Energieverbrauch. Das muss man entkoppeln.