minærva

C

SKRIPT

8 Brände, Brennstoffe und Kohlenstoffkreislauf

Erklärskript

Die Aufgaben 250–274 zu diesem Skript stehen im Aufgabenskript, die Lösungen im Lösungsskript. Verweise auf Aufgaben sind Links.

Chemie – Klasse 8 bis 10, G8 und G9

Pirmin Gohn

Nutzungshinweis: Dieses Skript darf nur im Rahmen des Unterrichts verwendet werden; insbesondere ist die eigenständige Weitergabe untersagt.

Skriptreihe C · Chemie (Klasse 8 bis 10, G8 und G9)

C1 Stoffe	C2 Atombau	C3 Reaktion	C4 Stoffmengen	C5 Bindungen
C6 Säuren, Basen	C7 Redox	C8 Kohlenstoff	C9 Kohlenwasserstoffe	C10 Alkohole, Ester

Lernen mit minærva

Dieses Skript ist ein Teil von minærva. Alles gehört zusammen: Jedes Thema führt von der Erklärung zum Üben, zum Ausprobieren und ins große Bild.

minaerva.de

Skripte Verstehen
Der Stoff zum Nachlesen: Erklärungen, Herleitungen, Beispiele und typische Fehler.
minaerva.de

noctua Üben
Fragen zu jedem Abschnitt, mit sofortiger Rückmeldung.
noctua.minaerva.de

fabrica Ausprobieren
Versuche und Anschauungen zum Selbermessen und Anfassen, ohne Konto, auch auf dem iPad.
fabrica.minaerva.de

tela Vernetzen
Das Wissensnetz: worauf ein Thema aufbaut und wohin es führt.
tela.minaerva.de

So greifen die Skripte ineinander

Erklärskripte	Chemie: zehn Themenskripte C1–C10 für die Klassen 8 bis 10 (im G9 bis Klasse 11) mit dem Stoff, aber ohne Aufgaben. Unter jeder Abschnittsüberschrift steht, in welcher Klasse das Thema im G8 und im G9 drankommt.
Aufgabenskript	Ein gemeinsames Aufgabenskript für alle Themen. Die Erklärskripte verweisen darauf; jede Aufgaben-, Abbildungs- und Tabellennummer gibt es in der Reihe nur einmal.
Lösungsskript	Die Lösungen zu allen Aufgaben, mit denselben Nummern.

Am Ende vieler Abschnitte stehen Links zur passenden Übung, zum Versuch und ins Wissensnetz. In der PDF-Datei lassen sie sich direkt antippen.

Inhaltsverzeichnis

Worum es geht **4**
1 Verbrennung und Brandschutz **5**
1.1 Was ein Feuer braucht 5
1.2 Wie man ein Feuer löscht 6
1.3 Brandklassen und Löschmittel 6
1.4 Der Fettbrand 7
1.5 Brandschutz in Schule und Haushalt 8
2 Kohlenstoffdioxid in der Luft **9**
2.1 Die Luft: ein Gasgemisch 9
2.2 Eigenschaften von Kohlenstoffdioxid 9
2.3 Woher Kohlenstoffdioxid kommt und wohin es geht 9
2.4 Der Anteil steigt 10
2.5 Die globalen Auswirkungen beurteilen 10
3 Der Kohlenstoffkreislauf **12**
3.1 Wo Kohlenstoff gespeichert ist 12
3.2 Die Reaktionen des Kreislaufs 12
3.3 Ein Kreislauf im Gleichgewicht 14
3.4 Eingriffe des Menschen bewerten 14
4 Brennstoffe im Vergleich **16**
4.1 Die Reaktionsgleichungen 16
4.2 Reaktionsenergie: Brennwert und Heizwert 16
4.3 Die Kohlenstoffdioxidbilanz 17
4.4 Energieträger beurteilen 18

Worum es geht

Am Abend brennen die Kerzen am Adventskranz, im Keller springt die Gasheizung an, draußen fährt ein Auto vorbei, und im Kamin des Nachbarn knistert ein Holzfeuer. Überall wird etwas verbrannt, und überall entsteht dabei ein unsichtbares Gas: Kohlenstoffdioxid. Wenn die trockenen Tannenzweige des Adventskranzes Feuer fangen, wird aus der gemütlichen Flamme in Sekunden ein gefährlicher Brand.

Dieses Skript zeigt, was ein Feuer braucht und wie man es löscht, welches Löschmittel zu welchem Brand passt und warum man brennendes Fett nie mit Wasser löschen darf. Es erklärt, welche Rolle das Kohlenstoffdioxid in der Luft spielt, wie Kohlenstoff-Atome zwischen Luft, Pflanzen, Tieren, Ozean und Gestein wandern und was der Mensch an diesem Kreislauf verändert. Zum Schluss werden Brennstoffe verglichen: Wie viel Energie liefern Wasserstoff, Erdgas, Benzin, Kohle und Holz, und wie viel Kohlenstoffdioxid entsteht dabei?

Brände, Brennstoffe und Kohlenstoffkreislauf im Lehrplan. G8: Klasse 8–10. G9: Klasse 8–11. Einzelne Abschnitte können davon abweichen; die Marken unter den Überschriften sagen es genau.

Lehrplan-Marken. Unter jeder Abschnittsüberschrift steht, in welcher Klasse das Thema im achtjährigen (G8) und im neunjährigen Gymnasium (G9) vorkommt, z. B. G8 · Kl. 8 G9 · Kl. 8. Ein Strich (G9 –) heißt: Im Lehrplan dieses Zugs kommt der Abschnitt nicht vor. Grundlage ist der Bildungsplan Baden-Württemberg (G8: Fassung vom 25.03.2022, G9: Fassung vom 08.04.2026). Der Bildungsplan fasst die Klassen 8 bis 10 zusammen (im G9 dazu Klasse 11 mit der organischen Chemie); die Klasse ist eine Empfehlung nach dem üblichen Gang der Schulbücher.

Die Aufgaben zu diesem Skript stehen im Aufgabenskript der Reihe, die Lösungen im Lösungsskript. Jeder Abschnitt endet mit Verweisen auf passende Übungen in **noctua** und Stationen in **fabrica**. Fachbegriffe sind beim ersten Auftreten **fett** gesetzt und am Ende jedes Kapitels zusammengefasst. Die beschriebenen Versuche sind Schulversuche: Sie werden nur im Chemieraum unter Aufsicht der Lehrkraft durchgeführt, viele nur von der Lehrkraft selbst. Die ersten beiden Kapitel gehören in Klasse 8 und kommen ohne Formeln aus; Kapitel 3 und 4 nutzen die Formelsprache aus Skript C4.

1 Verbrennung und Brandschutz

G8 · Kl. 8 G9 · Kl. 8

Jedes Jahr rückt die Feuerwehr in Deutschland zu vielen tausend Bränden aus. Die meisten beginnen klein: eine vergessene Pfanne auf dem Herd, eine Kerze zu nah am Vorhang, ein überhitztes Ladegerät. Wer weiß, was ein Feuer zum Brennen braucht, kann Brände verhindern und im Ernstfall richtig handeln.

1.1 Was ein Feuer braucht

Eine Verbrennung ist eine chemische Reaktion eines Stoffes mit Sauerstoff, bei der Licht und Wärme frei werden (Skript C3). Damit sie in Gang kommt und weiterläuft, müssen drei Bedingungen gleichzeitig erfüllt sein:

- Es muss ein **Brennstoff** da sein, also ein Stoff, der brennen kann: Holz, Papier, Wachs, Benzin, Erdgas.
- Es muss genug **Sauerstoff** an den Brennstoff gelangen, meist aus der Luft.
- Der Brennstoff muss heiß genug sein: Er muss seine **Zündtemperatur** erreichen.

Definition

Die **Zündtemperatur** ist die niedrigste Temperatur, bei der sich ein Stoff an der Luft von selbst entzündet und weiterbrennt. Holz zum Beispiel entzündet sich erst bei etwa 300 °C.

Man stellt die drei Bedingungen gern als Dreieck dar, das **Verbrennungsdreieck** (Abbildung 108). Fehlt eine Seite, bricht das Dreieck zusammen: Das Feuer geht aus.

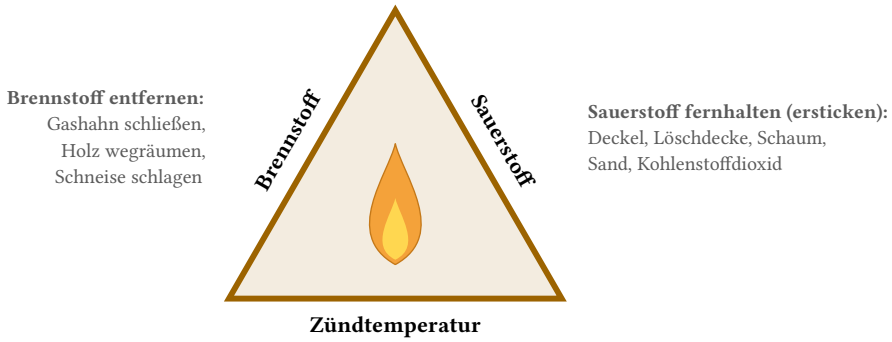


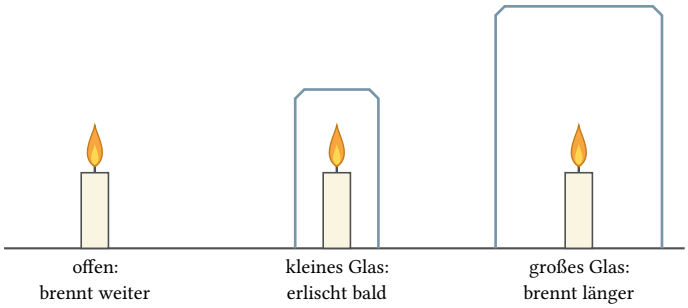
Abbildung 108: Das Verbrennungsdreieck: Ein Feuer brennt nur, wenn Brennstoff, Sauerstoff und eine ausreichend hohe Temperatur zusammenkommen. Außen die drei Wege, ein Feuer zu löschen.

Bei einer Kerze sieht man alle drei Bedingungen. Die Flamme schmilzt das Wachs, das flüssige Wachs steigt im Docht nach oben und verdampft. Brennen tut der Wachsdampf, der sich mit dem Sauerstoff der Luft mischt. Die Flamme selbst hält ihn über der Zündtemperatur. Bläst man die Kerze aus, kühlt der Luftstoß die Flamme und bläst den Wachsdampf weg: Die Verbrennung bricht ab.

Merksatz

Ein Feuer brennt nur, wenn **Brennstoff**, **Sauerstoff** und eine Temperatur über der **Zündtemperatur** zusammenkommen. Entfernt man eine dieser drei Bedingungen, erlischt es.

Versuch — Kerze unter dem Glas



Durchführung. Drei gleiche Teelichter oder Kerzen werden angezündet. Über eine stülpt man ein kleines Glas, über eine zweite ein großes Glas; die dritte bleibt offen. Man misst mit der Stoppuhr, wie lange die Kerzen unter den Gläsern noch brennen.

Beobachtung. Die offene Kerze brennt weiter. Unter dem kleinen Glas wird die Flamme schnell kleiner und erlischt nach kurzer Zeit, unter dem großen Glas brennt sie deutlich länger. Die Innenseite der Gläser beschlägt.
Deutung. Unter dem Glas kann keine frische Luft nachströmen. Die Kerze verbraucht den Sauerstoff im Glas; ist zu wenig übrig, erlischt sie, auch wenn noch ein Rest Sauerstoff im Glas ist. Im großen Glas ist mehr Luft und damit mehr Sauerstoff. Der Beschlag ist Wasser, ein Produkt der Verbrennung.
Sicherheit. Schutzbrille, standfeste Unterlage, keine brennbaren Gegenstände in der Nähe; Gläser nicht anfassen, solange sie heiß sind.

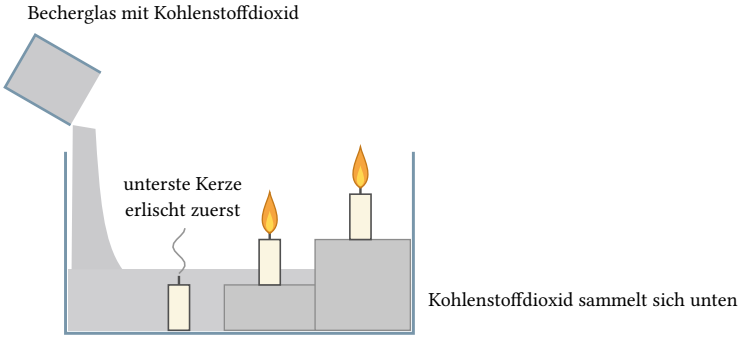
Auch der Zerteilungsgrad spielt eine Rolle (Skript C3): Holzspäne fangen viel leichter Feuer als ein dicker Holzklotz, und feiner Staub kann explosionsartig verbrennen. Deshalb fängt man ein Lagerfeuer mit Papier und dünnen Zweigen an.

1.2 Wie man ein Feuer löscht

Aus dem Verbrennungsdreieck folgen die drei Wege, ein Feuer zu löschen:

a) **Brennstoff entfernen.** Man dreht den Gashahn zu oder räumt brennbares Material weg. Bei Waldbränden schlägt die Feuerwehr Schneisen, damit das Feuer keine Nahrung mehr findet.
b) **Sauerstoff fernhalten.** Man deckt das Feuer ab, zum Beispiel mit einem Deckel, einer Löschdecke, Sand oder Löschschaum, oder man verdrängt die Luft mit einem nicht brennbaren Gas. Diese Art des Löschens heißt **Ersticken**.
c) **Abkühlen.** Man kühlt den Brennstoff unter seine Zündtemperatur. Das klassische Löschmittel dafür ist Wasser: Es nimmt beim Erwärmen und vor allem beim Verdampfen viel Energie auf. Der entstehende Wasserdampf verdrängt zusätzlich die Luft.

Versuch — Modell eines Kohlenstoffdioxid-Löschers



Durchführung. In einem Glasbecken stehen drei Teelichter auf verschieden hohen Stufen. In einem großen Becherglas wird Kohlenstoffdioxid gesammelt, zum Beispiel aus Backpulver und Essig oder aus einer Gasflasche. Dann gießt man das unsichtbare Gas vorsichtig wie eine Flüssigkeit über den Rand in das Becken.
Beobachtung. Die Kerzen erlöschen nacheinander, zuerst die unterste, zuletzt die oberste.
Deutung. Kohlenstoffdioxid ist schwerer als Luft. Es fließt nach unten, sammelt sich am Boden und steigt im Becken langsam an. Es brennt nicht, unterhält die Verbrennung nicht und verdrängt die Luft mit dem Sauerstoff: Die Flammen ersticken.
Sicherheit. Schutzbrille; Kohlenstoffdioxid nicht einatmen, den Raum lüften.

In einem echten **Kohlenstoffdioxid-Löscher** ist das Gas unter hohem Druck flüssig gelagert. Strömt es aus, dehnt es sich aus und kühlt dabei so stark ab, dass ein Teil als weißer „Schnee“ (Trockeneis, −78 °C) aus der Düse kommt. Der Löscher erstickt also und kühlt zugleich. Er hinterlässt keine Rückstände und eignet sich deshalb für Labore, Computer und elektrische Anlagen. In kleinen, geschlossenen Räumen ist er gefährlich, weil das Gas auch den Menschen den Sauerstoff nimmt.

1.3 Brandklassen und Löschmittel

Nicht jedes **Löschmittel** passt zu jedem Brand. Man teilt Brände deshalb nach dem brennenden Stoff in **Brandklassen** ein (Tabelle 43). Auf jedem Feuerlöscher steht, für welche Brandklassen er geeignet ist.

Klasse	brennender Stoff	Beispiele
A	feste Stoffe, die mit Glut brennen	Holz, Papier, Stoffe, Kohle, Stroh
B	flüssige oder flüssig werdende Stoffe	Benzin, Spiritus, Lacke, Wachs, viele Kunststoffe
C	Gase	Erdgas, Propan, Wasserstoff
D	Metalle	Magnesium, Aluminiumpulver, Natrium
F	Speiseöle und Speisefette	brennendes Öl in Pfanne oder Fritteuse

Tabelle 43: Brandklassen nach der Norm DIN EN 2.

Löschmittel	Wirkung	geeignet für, Hinweise
Wasser	kühlt	A; nicht bei Fett, Metallen und brennbaren Flüssigkeiten, nicht an elektrischen Anlagen
Schaum	deckt ab (erstickt) und kühlt	A, B
Löschpulver (ABC-Pulver)	hemmt die Reaktion in der Flamme, deckt Glut ab	A, B, C; verschmutzt stark
Kohlenstoffdioxid	erstickt, kühlt etwas	B; keine Rückstände; nicht in kleinen Räumen
Metallbrandpulver, trockener Sand	deckt ab (erstickt)	D
Fettbrandlöscher	bildet eine Sperrschicht auf dem Fett und kühlt	F
Deckel, Löschdecke	erstickt	kleine Brände, z. B. in einem Topf

Tabelle 44: Löschmittel und ihre Wirkung.

Bei brennenden Gasen dreht man zuerst die Gaszufuhr ab. Löscht man nur die Flamme, strömt weiter Gas aus und bildet mit der Luft ein explosives Gemisch. Brennende Metalle wie Magnesium reagieren sogar mit Wasser und Kohlenstoffdioxid weiter; sie werden mit Sand oder Spezialpulver abgedeckt.

1.4 Der Fettbrand

Ein besonders tückischer Brand ist der **Fettbrand** in der Küche. Öl in einer Pfanne, die man vergessen hat, wird immer heißer, beginnt zu rauchen und entzündet sich schließlich von selbst.

Versuch — Fettexplosion (Lehrerversuch im Freien, hier nur beschrieben)

Durchführung. Im Freien wird in einem Metalltiegel eine kleine Menge Speiseöl erhitzt, bis es sich entzündet. Aus großem Abstand gibt die Lehrkraft mit einer langen Stange ein wenig Wasser in das brennende Öl.

Beobachtung. Sofort schießt eine riesige Stichflamme meterhoch empor.

Deutung. Das brennende Öl ist weit über 100 °C heiß. Das Wasser sinkt darin nach unten, weil es schwerer ist, und verdampft schlagartig. Aus einem Liter Wasser entstehen dabei etwa 1700 Liter Dampf. Der Dampf reißt das brennende Öl in feinsten Tröpfchen mit nach oben. Die Tröpfchen haben eine riesige Oberfläche und verbrennen fast auf einmal.

Sicherheit. Nur die Lehrkraft, nur im Freien mit großem Sicherheitsabstand, kleine Ölmenge, Schutzkleidung; niemals nachmachen.

Typischer Fehler

Falsch: Brennt Öl in der Pfanne, kippt man schnell Wasser darauf.

Richtig: Herd ausschalten und einen passenden Deckel auflegen (ersticken) oder einen Fettbrandlöscher benutzen. Die Pfanne nicht wegtragen.

Wasser auf brennendem Fett führt zu einer Fettexplosion. Der Deckel nimmt dem Feuer den Sauerstoff; bleibt er liegen, bis das Öl abgekühlt ist, flammt es nicht wieder auf.

1.5 Brandschutz in Schule und Haushalt

Brandschutz heißt: Brände verhindern (vorbeugender Brandschutz), Menschen im Brandfall schützen und retten und Brände schnell löschen. Viele Regeln wirken auf den ersten Blick lästig, lassen sich aber mit dem Verbrennungsdreieck und mit den Gefahren eines Brandes begründen (Tabelle 45).

Maßnahme	Begründung
Kerzen nie unbeaufsichtigt brennen lassen, Abstand zu Vorhängen und trockenen Zweigen	Brennstoff und Zündquelle getrennt halten
keine Kabel unter Teppichen, Mehrfachsteckdosen nicht hintereinanderstecken	überlastete Leitungen werden heiß und können die Umgebung über die Zündtemperatur erhitzen
Rauchwarnmelder in Schlafräumen und Fluren	Rauch weckt Schlafende nicht, aber der laute Alarm
Brandschutztüren nie festkeilen	geschlossene Türen halten Rauch und Feuer auf und bremsen die Luftzufuhr
Fluchtwege frei halten, Aufzug im Brandfall nicht benutzen	man muss schnell und sicher hinauskommen; ein Aufzug kann stecken bleiben oder in den Rauch fahren
im Rauch gebückt oder kriechend gehen	heißer Rauch steigt nach oben, am Boden ist die Luft länger atembar
Feuerlöscher, Löschdecke und Not-Aus im Chemieraum kennen	kleine Brände sofort löschen; der Not-Aus-Schalter sperrt Gas und Strom

Tabelle 45: Maßnahmen zum Brandschutz und ihre Begründung.

Die meisten Menschen, die bei Bränden sterben, verbrennen nicht, sondern ersticken am Rauch. Brennen Holz, Kunststoffe oder Polstermöbel mit zu wenig Sauerstoff, entstehen Ruß und giftige Gase, zum Beispiel das geruchlose **Kohlenstoffmonoxid**. Schon wenige Atemzüge können bewusstlos machen.

Merksatz

Im Brandfall gilt: **Ruhe bewahren, Menschen warnen und retten, Notruf 112, Türen schließen, über die gekennzeichneten Fluchtwege zum Sammelplatz gehen.** Löschen nur, wenn es ohne Gefahr möglich ist. Menschenrettung geht vor Brandbekämpfung.

Beim Notruf hilft eine einfache Reihenfolge: **Wo** brennt es? **Was** brennt? **Wie viele** Verletzte gibt es? Dann **warten**, bis die Leitstelle keine Fragen mehr hat.

Fachbegriffe: Brennstoff · Sauerstoff · Zündtemperatur · Verbrennungsdreieck · Ersticken · Abkühlen · Kohlenstoffdioxid-Löscher · Brandklasse · Löschmittel · Fettbrand · Brandschutz · Rauchwarnmelder · Kohlenstoffmonoxid

Üben: **noctua** ↗ Ausprobieren: **Branddreieck und Löschen** ↗

2 Kohlenstoffdioxid in der Luft

G8 · Kl. 8 G9 · Kl. 8

Öffnet man eine Flasche Sprudel, perlen Bläschen auf. Atmet man an einem kalten Tag aus, sieht man den Atem. Und im Klassenzimmer wird die Luft nach einer Doppelstunde „verbraucht“. In allen drei Fällen spielt Kohlenstoffdioxid eine Rolle, ein Gas, das nur einen winzigen Teil der Luft ausmacht und trotzdem für das Leben und das Klima der Erde entscheidend ist.

2.1 Die Luft: ein Gasgemisch

Skript C1 hat gezeigt, dass Luft ein Gemisch aus mehreren Gasen ist. Weil es Gase sind, gibt man die Anteile als **Volumenanteile** an: In 100 L trockener Luft sind etwa

- 78 L **Stickstoff**,
- 21 L **Sauerstoff**,
- knapp 1 L **Edelgase**, vor allem Argon,
- 0,04 L **Kohlenstoffdioxid**, das sind nur 40 mL.

Für so kleine Anteile benutzt man die Einheit **ppm** („Teile pro Million“): Von einer Million Teilchen der Luft waren 2025 im Jahresmittel 427 Kohlenstoffdioxid-Teilchen (NOAA, Messstation Mauna Loa auf Hawaii). Dazu kommt, je nach Wetter, bis zu einigen Prozent Wasserdampf.

2.2 Eigenschaften von Kohlenstoffdioxid

Eigenschaft	Folge, Verwendung
farblos, geruchlos	man bemerkt es nicht
etwa 1,5-mal so schwer wie Luft (1,98 g gegenüber 1,29 g je Liter bei 0 °C)	sammelt sich am Boden, lässt sich „ausgießen“
brennt nicht, unterhält die Verbrennung nicht	Feuerlöscher
löst sich in Wasser, die Lösung ist schwach sauer	Sprudel und Limonade („Kohlensäure“)
wird bei −78 °C fest, ohne vorher flüssig zu werden	**Trockeneis** zum Kühlen, Nebel auf Bühnen
trübt Kalkwasser	Nachweis (**Kalkwasserprobe**, Skript C3)

Tabelle 46: Eigenschaften von Kohlenstoffdioxid.

Weil Kohlenstoffdioxid schwerer als Luft ist und man es nicht riecht, kann es in Senken, Weinkellern und Futtersilos gefährlich werden: Bei der Gärung von Traubensaft oder Futter entsteht viel Kohlenstoffdioxid, das sich am Boden sammelt. In hoher Konzentration macht es bewusstlos und kann töten. Früher nahmen Winzer deshalb eine brennende Kerze mit in den Gärkeller. Erlosch sie, musste man sofort hinaus.

Versuch — Eingeatmete und ausgeatmete Luft

Durchführung. Zwei Reagenzgläser werden zur Hälfte mit klarem Kalkwasser gefüllt. In das erste pumpt man mit einer großen Spritze oder einer kleinen Pumpe Raumluft, in das zweite bläst man mit einem Strohhalm vorsichtig ausgeatmete Luft, jeweils etwa gleich lange.

Beobachtung. Das Kalkwasser mit der ausgeatmeten Luft wird nach kurzer Zeit milchig trüb. Mit Raumluft bleibt es lange klar und trübt sich erst nach sehr langem Pumpen schwach.

Deutung. Ausgeatmete Luft enthält viel mehr Kohlenstoffdioxid als eingeatmete, nämlich etwa 4 % statt 0,04 %, also rund hundertmal so viel. Der Körper gewinnt Energie, indem er Nährstoffe mit Sauerstoff zu Kohlenstoffdioxid und Wasser umsetzt (Zellatmung).

Sicherheit. Schutzbrille, Kalkwasser reizt die Augen; nur ausblasen, nie am Strohhalm saugen.

2.3 Woher Kohlenstoffdioxid kommt und wohin es geht

Kohlenstoffdioxid gelangt auf vielen Wegen in die Luft:

- durch die **Atmung** von Menschen, Tieren und Pflanzen,
- durch die **Verbrennung** von Holz, Kohle, Erdöl und Erdgas (Skript C3),
- durch die **Zersetzung** abgestorbener Pflanzen und Tiere durch Bakterien und Pilze,

- durch die **Gärung**, etwa wenn Hefe einen Brotteig aufgehen lässt,
- aus Vulkanen.

Aus der Luft verschwindet es vor allem auf zwei Wegen: Pflanzen nehmen es bei der **Fotosynthese** auf und bauen daraus mithilfe von Licht Traubenzucker auf. Und es löst sich im Wasser der Ozeane. Wie diese Vorgänge zusammenhängen, zeigt Kapitel 3.

Wie stark die Pflanzen wirken, sieht man an den Messwerten vom Mauna Loa: Der Kohlenstoffdioxidanteil schwankt jedes Jahr um etwa 6 ppm. Im Frühling und Sommer der Nordhalbkugel, wenn dort die Pflanzen wachsen, sinkt er; im Herbst und Winter, wenn Laub verrottet und kaum Fotosynthese stattfindet, steigt er wieder.

2.4 Der Anteil steigt

Seit 1958 wird der Kohlenstoffdioxidanteil am Mauna Loa genau gemessen. Die Jahresmittel zeigen einen ständigen Anstieg (Abbildung 109, wie in Skript C1).

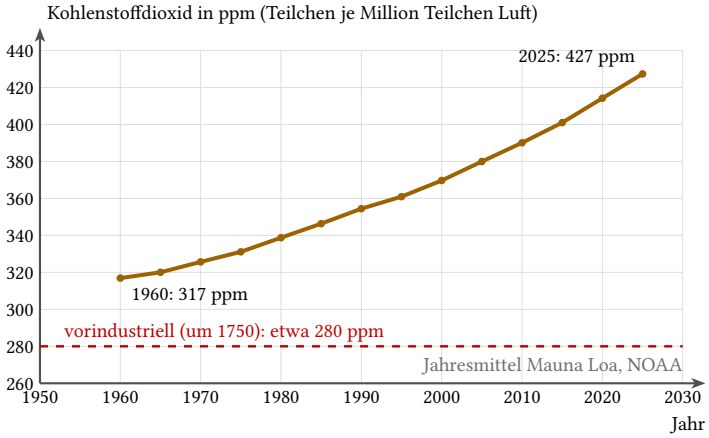


Abbildung 109: Kohlenstoffdioxid in der Luft, Jahresmittel am Mauna Loa (Daten: NOAA Global Monitoring Laboratory). Gestrichelt: Wert vor Beginn der Industrialisierung (IPCC 2021).

Um 1750 lag der Anteil bei etwa 280 ppm, 2025 bei 427 ppm: eine Zunahme um gut die Hälfte. Die wichtigste Ursache ist das Verbrennen von Kohle, Erdöl und Erdgas in Kraftwerken, Heizungen, Fabriken und Fahrzeugen; dazu kommt das Abholzen und Abbrennen von Wäldern.

2.5 Die globalen Auswirkungen beurteilen

Kohlenstoffdioxid lässt das Sonnenlicht fast ungehindert durch. Die Erdoberfläche erwärmt sich und gibt Wärmestrahlung ab. Einen Teil davon nehmen Kohlenstoffdioxid und Wasserdampf in der Luft auf und strahlen ihn wieder zur Erde zurück (Abbildung 110). Ohne diesen **natürlichen Treibhauseffekt** läge die mittlere Temperatur an der Erdoberfläche bei etwa −18 °C statt bei etwa +15 °C.

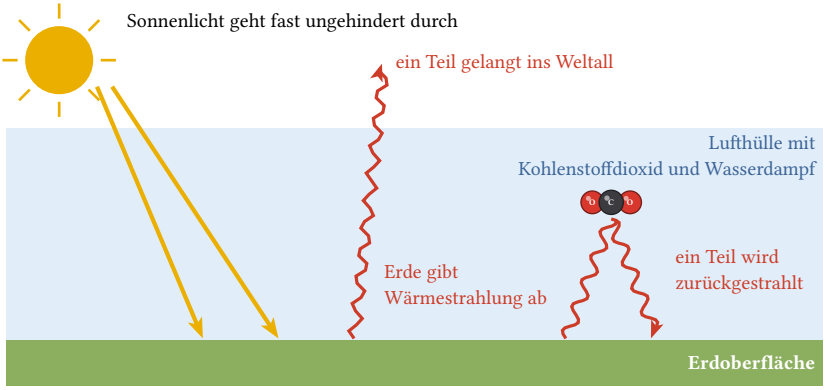


Abbildung 110: Der Treibhauseffekt (schematisch, nicht maßstäblich).

Mehr Kohlenstoffdioxid verstärkt den Effekt. Die mittlere Temperatur an der Erdoberfläche lag 2011 bis 2020 schon um etwa 1,1 °C höher als 1850 bis 1900 (IPCC 2021). Diese **Erderwärmung** hat Folgen auf der ganzen Erde:

- Gletscher und das Eis an den Polen schmelzen, der Meeresspiegel steigt;
- Hitzewellen, Dürren und Starkregen werden häufiger und stärker;

- Pflanzen und Tiere verlieren ihre Lebensräume;
- mehr Kohlenstoffdioxid löst sich im Meer, das Wasser wird saurer (**Versauerung der Ozeane**), und Muscheln und Korallen bilden ihre Kalkschalen schlechter.

Typischer Fehler

Falsch: Der Treibhauseffekt kommt vom Ozonloch: Durch das Loch kommt mehr Sonnenwärme herein.

Richtig: Das Ozonloch lässt mehr ultraviolettes Licht durch, das Haut und Augen schädigt. Die Erwärmung kommt von Gasen wie Kohlenstoffdioxid, die Wärmestrahlung der Erde zurückhalten.

Ozonloch und Treibhauseffekt sind zwei verschiedene Umweltprobleme.

Beispiel 1

Eine Veränderung beurteilen. Wer beurteilt, sammelt zuerst Fakten und wägt sie dann nach **Kriterien** ab. Fakten: Der Anteil ist seit 1750 um gut die Hälfte gestiegen, und er steigt immer schneller; die Ursache sind vor allem Verbrennungen. Kriterien: Wie groß und wie schnell ist die Veränderung? Wen treffen die Folgen, heute und künftig? Lässt sie sich rückgängig machen? Was kosten Gegenmaßnahmen, was kostet Nichtstun? Ein begründetes Urteil könnte lauten: Der Anstieg ist bedenklich, weil er sehr schnell verläuft, weltweit wirkt und Kohlenstoffdioxid lange in der Luft bleibt; deshalb sollte weniger verbrannt werden, auch wenn die Umstellung Geld und Mühe kostet.

Fachbegriffe: Luft · Volumenanteil · Stickstoff · Sauerstoff · Edelgase · Kohlenstoffdioxid · ppm · Trockeneis · Kalkwasserprobe · Atmung · Gärung · Fotosynthese · Treibhauseffekt · Erderwärmung · Versauerung der Ozeane

Üben: **noctua** ↗ Ausprobieren: **CO_2-Badewanne und Restbudget** ↗ · **Einfaches Treibhausmodell** ↗

3 Der Kohlenstoffkreislauf

G8 · Kl. 10 G9 · Kl. 10

Ein Kohlenstoff-Atom in deinem Fingernagel war vielleicht vor einigen Monaten Teil eines Weizenkorns, davor Teil eines Kohlenstoffdioxid-Moleküls in der Luft über dem Atlantik und noch früher Teil eines Baums, der vor Jahrzehnten verbrannt ist. Atome werden bei chemischen Reaktionen weder zerstört noch neu gebildet (Skript C3); sie wandern von Stoff zu Stoff. Für den Kohlenstoff ergibt sich daraus ein großer Kreislauf, der die ganze Erde umfasst.

3.1 Wo Kohlenstoff gespeichert ist

Kohlenstoff kommt auf der Erde in vielen Verbindungen vor. Die Orte, an denen er sich ansammelt, heißen **Kohlenstoffspeicher**:

- **Luft:** als Kohlenstoffdioxid CO_2. Aus dem Anteil von 427 ppm folgen etwa 900 Gigatonnen Kohlenstoff (1 ppm entspricht 2,12 Gt Kohlenstoff; 1 Gt = 1 Milliarde Tonnen).
- **Lebewesen:** in organischen Stoffen wie Traubenzucker, Stärke, Cellulose (Holz), Fetten und Eiweißen.
- **Boden:** in abgestorbenen Pflanzenteilen und Humus; besonders viel in Mooren.
- **Ozean:** als gelöstes Kohlenstoffdioxid und als Hydrogencarbonat-Ionen HCO_3^-, insgesamt etwa 40-mal so viel Kohlenstoff wie in der Luft.
- **Gestein:** in Kalk (Calciumcarbonat $CaCO_3$), der aus Schalen von Meerestieren entstanden ist. Hier steckt der weitaus größte Teil des Kohlenstoffs der Erde.
- **Fossile Speicher:** in Kohle, Erdöl und Erdgas, die vor Jahrmillionen aus Lebewesen entstanden sind.

3.2 Die Reaktionen des Kreislaufs

Der Kohlenstoff wandert durch chemische Reaktionen von einem Speicher in den anderen. Die wichtigsten sind:

Fotosynthese. Grüne Pflanzen, Algen und manche Bakterien bauen aus Kohlenstoffdioxid und Wasser mithilfe von Lichtenergie Traubenzucker (Glucose) auf; Sauerstoff wird frei. Die Reaktion ist endotherm: Die Lichtenergie wird als chemische Energie im Traubenzucker gespeichert.

$$6CO_2 + 6H_2O \rightarrow C_6H_{12}O_6 + 6O_2 \quad \text{(Lichtenergie wird aufgenommen)}$$

Aus Traubenzucker bauen die Pflanzen Stärke, Cellulose und alle anderen Stoffe auf, aus denen sie bestehen.

Zellatmung. Pflanzen, Tiere, Menschen, Pilze und Bakterien gewinnen Energie, indem sie Traubenzucker und andere Nährstoffe mit Sauerstoff wieder zu Kohlenstoffdioxid und Wasser umsetzen. Das ist die Umkehrung der Fotosynthese; sie ist exotherm.

$$C_6H_{12}O_6 + 6O_2 \rightarrow 6CO_2 + 6H_2O \quad \text{(Energie wird frei)}$$

Zersetzung. Abgestorbene Pflanzen und Tiere, Laub und Kot werden von Bakterien, Pilzen und Kleintieren abgebaut, den **Zersetzern** (Destruenten). Auch sie atmen und geben den Kohlenstoff als Kohlenstoffdioxid an die Luft zurück.

Lösen im Ozean. Kohlenstoffdioxid löst sich im Wasser; ein kleiner Teil reagiert mit dem Wasser zu Kohlensäure, die zu Hydrogencarbonat-Ionen und Oxonium-Ionen weiterreagiert (Skript C6). Wo das Wasser warm ist oder weniger Kohlenstoffdioxid in der Luft ist, gast es wieder aus.

$$CO_2 + 2H_2O \Leftrightarrow HCO_3^- + H_3O^+$$

Kalkbildung. Muscheln, Schnecken, Korallen und Kalkalgen bilden aus Calcium-Ionen und Carbonat-Ionen des Meerwassers ihre Schalen und Skelette aus Kalk. Sterben sie, sinken die Schalen ab; über Jahrmillionen entsteht Kalkgestein.

$$Ca^{2+} + CO_3^{2-} \rightarrow CaCO_3$$

Bildung fossiler Brennstoffe. Wenn abgestorbene Pflanzen unter Luftabschluss begraben werden, etwa in Sümpfen, werden sie nicht vollständig zersetzt. Unter Druck und Wärme entstanden daraus über Jahrmillionen Torf, Braunkohle und Steinkohle. Erdöl und Erdgas bildeten sich aus abgestorbenem Plankton am Meeresgrund.

Verbrennung. Holz, Kohle, Erdöl und Erdgas verbrennen mit Sauerstoff zu Kohlenstoffdioxid und Wasser, zum Beispiel Methan, der Hauptbestandteil von Erdgas:

$$CH_4 + 2O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O$$

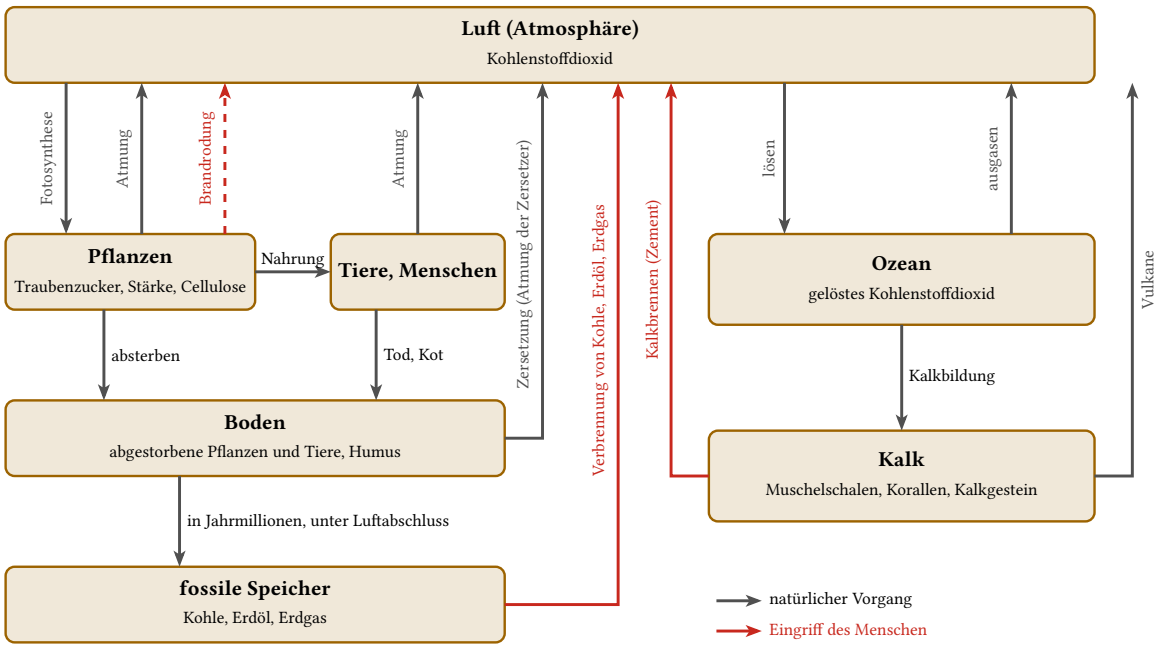


Abbildung 111: Der Kohlenstoffkreislauf (schematisch). Kästen: Kohlenstoffspeicher, Pfeile: Reaktionen und Vorgänge, durch die Kohlenstoff von einem Speicher in einen anderen gelangt.

Vorgang	Kohlenstoff wandert von …	… nach
Fotosynthese	Kohlenstoffdioxid der Luft	Traubenzucker in Pflanzen
Nahrungsaufnahme	Pflanzen	Tiere und Menschen
Zellatmung	Nährstoffe in Lebewesen	Kohlenstoffdioxid der Luft
Zersetzung	tote Lebewesen im Boden	Kohlenstoffdioxid der Luft
Lösen, Ausgasen	Luft ↔ Ozean	Ozean ↔ Luft
Kalkbildung	gelöste Ionen im Ozean	Kalkschalen, Kalkgestein
Bildung fossiler Brennstoffe	Pflanzen, Plankton	Kohle, Erdöl, Erdgas (Jahrmillionen)
Verbrennung	Holz, Kohle, Erdöl, Erdgas	Kohlenstoffdioxid der Luft

Tabelle 47: Der Kohlenstoffkreislauf als System chemischer Reaktionen.

Die Kohlenstoff-Atome verlassen also nie den Kreislauf; sie werden nur in andere Verbindungen eingebaut. Manche Wege sind schnell: Ein Kohlenstoff-Atom im Laub eines Baums ist nach ein, zwei Jahren wieder in der Luft. Andere sind sehr langsam: In Kohle, Erdöl, Erdgas und Kalkgestein liegt Kohlenstoff für Jahrmillionen fest.

Versuch — Kohlenstoffdioxid im Kalk

Durchführung. Auf ein Stück Marmor oder eine Muschelschale tropft man verdünnte Salzsäure. Das entstehende Gas leitet man mit einem Gasableitungsrohr in Kalkwasser.

Beobachtung. Es schäumt, ein farbloses Gas entsteht, das Kalkwasser wird trüb.

Deutung. Marmor und Muschelschalen bestehen aus Kalk, Calciumcarbonat. Mit der Säure wird das gebundene Kohlenstoffdioxid frei: $CaCO_3 + 2\ HCl \rightarrow CaCl_2 + H_2O + CO_2$. Kalk ist ein Kohlenstoffspeicher.

Sicherheit. Verdünnte Salzsäure reizt Haut und Augen: Schutzbrille, Spritzer sofort abwaschen.

Versuch — Kohlenstoffdioxid macht Wasser sauer

Durchführung. In ein Becherglas mit Leitungswasser gibt man einige Tropfen Universalindikator. Dann leitet man Kohlenstoffdioxid aus einer Gasflasche ein oder bläst mit einem Strohhalm ausgeatmete Luft hinein.

Beobachtung. Der Indikator färbt sich von Grün über Gelbgrün nach Gelb.

Deutung. Gelöstes Kohlenstoffdioxid bildet mit Wasser Oxonium-Ionen, die Lösung wird schwach sauer. So erklärt sich die Versauerung der Ozeane, wenn sie mehr Kohlenstoffdioxid aufnehmen.

Sicherheit. Schutzbrille; nur ausblasen, nicht saugen.

3.3 Ein Kreislauf im Gleichgewicht

Die natürlichen Flüsse sind gewaltig: Allein die Pflanzen an Land nehmen durch Fotosynthese jedes Jahr mehr als 100 Gigatonnen Kohlenstoff aus der Luft auf, und fast genauso viel geben Atmung und Zersetzung wieder ab. Auch Ozean und Luft tauschen jedes Jahr Dutzende Gigatonnen Kohlenstoff aus. Über Jahrhunderte hielten sich Aufnahme und Abgabe nahezu die Waage; der Kohlenstoffdioxidanteil der Luft blieb vor der Industrialisierung lange bei etwa 280 ppm. Seitdem holt der Mensch Kohlenstoff aus Speichern, die Jahrmillionen lang abgeschlossen waren, und bringt ihn als Kohlenstoffdioxid in die Luft. Verglichen mit den natürlichen Flüssen ist das wenig, aber es fließt nur in eine Richtung und sammelt sich deshalb an (Abbildung 112).

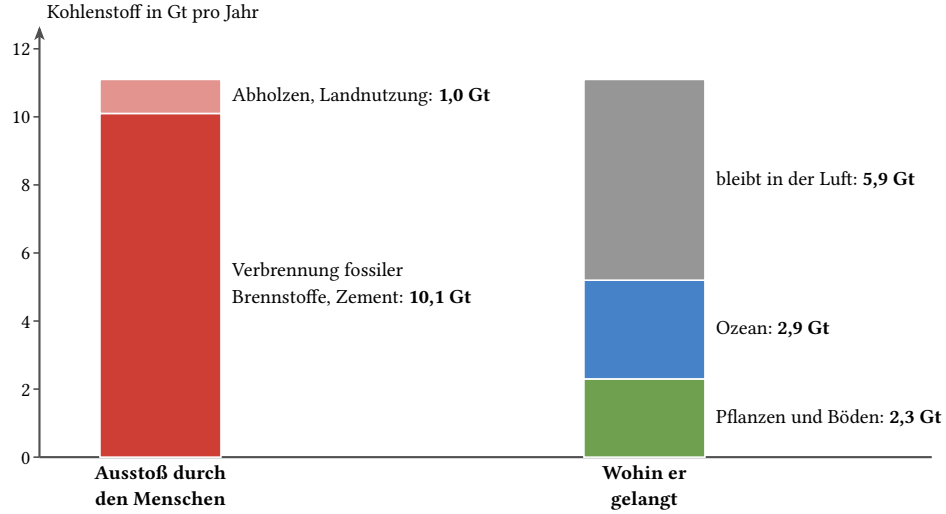


Abbildung 112: Kohlenstoff, den der Mensch 2023 in die Luft gebracht hat, und wohin er gelangt ist (Global Carbon Budget 2024). Werte in Gigatonnen Kohlenstoff pro Jahr; die Masse Kohlenstoffdioxid ist $\frac{44}{12} \approx 3{,}7$-mal so groß.

Von den 11,1 Gt Kohlenstoff, die der Mensch 2023 freigesetzt hat, blieb gut die Hälfte in der Luft. Etwa ein Viertel nahm der Ozean auf, etwa ein Fünftel die Pflanzen und Böden an Land, die bei mehr Kohlenstoffdioxid etwas stärker wachsen.

Beispiel 2

Von Gigatonnen zu ppm. 2023 blieben 5,9 Gt Kohlenstoff in der Luft. Mit 1 ppm $\hat{=}$ 2,12 Gt Kohlenstoff ergibt das eine Zunahme um

$$\frac{5{,}9\ \text{Gt}}{2{,}12\ \frac{\text{Gt}}{\text{ppm}}} \approx 2{,}8\ \text{ppm}$$

in einem einzigen Jahr. Als Masse Kohlenstoffdioxid sind das $5{,}9\ \text{Gt} \cdot \frac{44}{12} \approx 22\ \text{Gt}$, denn in 44 g Kohlenstoffdioxid stecken 12 g Kohlenstoff.

3.4 Eingriffe des Menschen bewerten

Der Mensch greift an mehreren Stellen in den Kreislauf ein (rote Pfeile in Abbildung 111):

- **Verbrennung fossiler Brennstoffe:** Kohle, Erdöl und Erdgas liefern den größten Teil der Energie für Strom, Wärme und Verkehr. Ihr Kohlenstoff war Jahrmillionen aus dem Kreislauf entfernt.
- **Abholzen und Brandrodung:** Werden Wälder abgebrannt, um Weideland oder Felder zu gewinnen, gelangt ihr Kohlenstoff sofort in die Luft. Zugleich fehlen die Bäume, die Kohlenstoffdioxid aufnehmen würden.
- **Trockenlegen von Mooren:** Im nassen Moor zersetzen sich Pflanzenreste kaum, weil Sauerstoff fehlt. Wird es entwässert, gelangt Sauerstoff an den Torf, und die Zersetzer bauen ihn zu Kohlenstoffdioxid ab.
- **Zementherstellung:** Für Zement wird Kalk gebrannt: $CaCO_3 \rightarrow CaO + CO_2$. Dabei wird Kohlenstoffdioxid aus dem Gestein frei, zusätzlich zu dem aus dem Brennstoff für den Ofen.

Die Folgen sind die Erderwärmung und die Versauerung der Ozeane (Kapitel 2). Gegenmaßnahmen setzen an denselben Stellen an: weniger fossile Brennstoffe verbrennen (Strom aus Sonne, Wind und Wasser, sparsame Geräte, gedämmte Häuser, Bus, Bahn und Fahrrad), Wälder schützen und aufforsten, Moore wieder vernässen. Diskutiert wird auch, Kohlenstoffdioxid aus Abgasen abzutrennen und tief im Boden zu speichern.

Beispiel 3

Eine Maßnahme bewerten: Aufforsten.

Fakten: Wachsende Bäume nehmen Kohlenstoffdioxid auf und speichern den Kohlenstoff im Holz. Ein Wald braucht Jahrzehnte, bis er viel gespeichert hat. Brennt er ab oder wird das Holz verbrannt, wird der Kohlenstoff wieder frei.
Kriterien: Wie viel Kohlenstoff wird gebunden? Wie lange bleibt er gebunden? Welche Flächen werden gebraucht, und was wird dort sonst angebaut? Welche Nebenwirkungen gibt es (Artenvielfalt, Wasserhaushalt)?
Urteil: Aufforsten ist sinnvoll, weil es zusätzlich Kohlenstoff bindet und Lebensräume schafft. Es kann das Verbrennen fossiler Brennstoffe aber nicht ausgleichen, denn dafür würden die Flächen nicht reichen, und der Wald speichert den Kohlenstoff nicht sicher für Jahrmillionen. Wichtiger ist es, weniger Kohlenstoffdioxid auszustoßen.

Typischer Fehler

Falsch: Bei der Verbrennung wird Kohlenstoff vernichtet; er ist danach weg.
Richtig: Die Kohlenstoff-Atome bleiben erhalten. Sie stecken danach im Kohlenstoffdioxid in der Luft.

Nach dem Atommodell von Dalton werden bei Reaktionen keine Atome vernichtet. Gerade deshalb reichert sich der Kohlenstoff aus fossilen Brennstoffen in der Luft an.

Fachbegriffe: Kohlenstoffkreislauf · Kohlenstoffspeicher · Fotosynthese · Zellatmung · Zersetzer (Destruenten) · Kalkbildung · fossile Brennstoffe · Brandrodung · Versauerung der Ozeane · Gigatonne

Üben: **noctua** ↗ Ausprobieren: **CO_2-Badewanne und Restbudget** ↗

4 Brennstoffe im Vergleich

G8 · Kl. 10 G9 · Kl. 11

Heizen mit Erdgas oder mit Holzpellets? Fahren mit Benzin, mit Strom oder mit Wasserstoff? Wer **Energieträger** vergleichen will, braucht vor allem zwei Antworten: Wie viel Energie liefert ein Brennstoff? Und wie viel Kohlenstoffdioxid entsteht dabei? Beides lässt sich aus der Reaktionsgleichung und aus Messwerten berechnen.

4.1 Die Reaktionsgleichungen

Alle Brennstoffe dieses Kapitels reagieren bei vollständiger Verbrennung mit Sauerstoff. Enthalten sie Kohlenstoff, entsteht Kohlenstoffdioxid, enthalten sie Wasserstoff, entsteht Wasser.

Brennstoff	Stoff (Modell)	Reaktionsgleichung
Wasserstoff	Wasserstoff	$2\,H_2 + O_2 \rightarrow 2\,H_2O$
Erdgas	**Methan**	$CH_4 + 2\,O_2 \rightarrow CO_2 + 2\,H_2O$
Benzin	Octan	$2\,C_8H_{18} + 25\,O_2 \rightarrow 16\,CO_2 + 18\,H_2O$
Kohle	Kohlenstoff	$C + O_2 \rightarrow CO_2$
Holz	Cellulose (Baustein)	$C_6H_{10}O_5 + 6\,O_2 \rightarrow 6\,CO_2 + 5\,H_2O$

Tabelle 48: Verbrennungsgleichungen. Benzin ist ein Gemisch vieler Kohlenwasserstoffe; Octan dient als Modell. Kohle besteht großenteils, aber nicht nur aus Kohlenstoff.

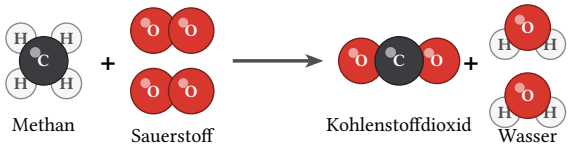


Abbildung 113: Verbrennung von Methan im Kugelmodell: Aus einem Methan-Molekül und zwei Sauerstoff-Molekülen entstehen ein Kohlenstoffdioxid-Molekül und zwei Wasser-Moleküle.

Wasserstoff enthält keinen Kohlenstoff; bei seiner Verbrennung entsteht nur Wasser. Bei den anderen Brennstoffen hängt es vom Verhältnis der Atome ab, wie viel Kohlenstoffdioxid und wie viel Wasser entstehen: Methan hat vier Wasserstoff-Atome je Kohlenstoff-Atom, Octan gut zwei, reiner Kohlenstoff keines.

4.2 Reaktionsenergie: Brennwert und Heizwert

Bei der Verbrennung wird chemische Energie als Wärme frei, die **Reaktionsenergie**. Wie viel, misst man im Labor und gibt es zunächst je Mol an: Verbrennt 1 mol Methan, werden 802,5 kJ frei, wenn das Wasser als Dampf entweicht, und 890,5 kJ, wenn der Wasserdampf zu flüssigem Wasser kondensiert und seine Kondensationswärme ebenfalls abgibt. Für den Alltag rechnet man auf die Masse um.

Definition

Der **Heizwert** eines Brennstoffs ist die Wärme, die bei der vollständigen Verbrennung von 1 kg (oder 1 g) frei wird, wenn das entstehende Wasser gasförmig bleibt. Beim **Brennwert** wird zusätzlich die Wärme mitgezählt, die frei wird, wenn der Wasserdampf kondensiert; er ist deshalb größer. Einheit: $\frac{\text{MJ}}{\text{kg}}$, was dasselbe ist wie $\frac{\text{kJ}}{\text{g}}$.

Heizungen und Motoren lassen den Wasserdampf meist mit den Abgasen entweichen; für sie zählt der Heizwert. Moderne Brennwertkessel kühlen die Abgase so weit ab, dass der Dampf kondensiert, und nutzen so auch den Unterschied.

Beispiel 4

Heizwert von Methan. Die molare Masse von Methan ist $M(CH_4) = 16{,}0\ \frac{\text{g}}{\text{mol}}$. 1 mol Methan wiegt also 16,0 g und liefert 802,5 kJ:

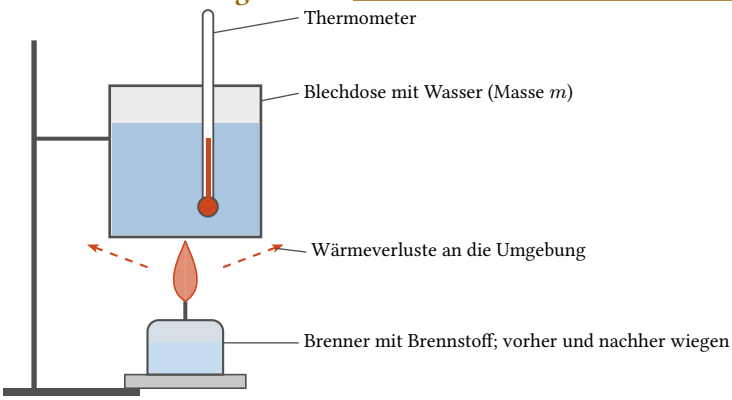
$$H_\text{i} = \frac{802{,}5\ \text{kJ}}{16{,}0\ \text{g}} = 50{,}2\ \frac{\text{kJ}}{\text{g}} = 50{,}2\ \frac{\text{MJ}}{\text{kg}}$$

Der Brennwert ist $\frac{890{,}5\ \text{kJ}}{16{,}0\ \text{g}} = 55{,}7\ \frac{\text{kJ}}{\text{g}}$, gut ein Zehntel mehr.

Stoff	frei je mol (Wasser gasförmig)	M in $\frac{\text{g}}{\text{mol}}$	Heizwert in $\frac{\text{kJ}}{\text{g}}$	Brennwert in $\frac{\text{kJ}}{\text{g}}$
Wasserstoff H_2	241,8 kJ	2,0	120,9	142,9
Methan CH_4	802,5 kJ	16,0	50,2	55,7
Octan C_8H_{18}	5073,9 kJ	114,2	44,4	47,9
Kohlenstoff C	393,5 kJ	12,0	32,8	32,8

Tabelle 49: Heizwert und Brennwert reiner Brennstoffe, berechnet aus Verbrennungsenergien (Datengrundlage: CRC Handbook of Chemistry and Physics). Bei Kohlenstoff entsteht kein Wasser, beide Werte sind gleich.

Versuch — Energie von Brennstoffen vergleichen



Durchführung. Ein kleiner Brenner mit Brennspiritus wird gewogen. Über ihm hängt eine Blechdose mit 100 g Wasser und einem Thermometer. Man liest die Anfangstemperatur ab, zündet den Brenner an und löscht ihn, wenn das Wasser um etwa 20 K wärmer geworden ist. Dann wiegt man den Brenner erneut. Der Versuch wird mit Lampenöl oder einer Kerze wiederholt.

Beobachtung. Beispielmessung mit Brennspiritus: Das Wasser erwärmt sich um 20,0 K, der Brenner wird um 0,70 g leichter.

Deutung. Das Wasser hat die Wärme $Q = c \cdot m \cdot \Delta T = 4{,}19\ \frac{\text{J}}{\text{g}\cdot\text{K}} \cdot 100\ \text{g} \cdot 20{,}0\ \text{K} = 8380\ \text{J} \approx 8{,}4\ \text{kJ}$ aufgenommen. Je Gramm Brennstoff sind das $\frac{8{,}4\ \text{kJ}}{0{,}70\ \text{g}} = 12\ \frac{\text{kJ}}{\text{g}}$. Der Tabellenwert für Ethanol, den Hauptbestandteil von Brennspiritus, ist 26,8 $\frac{\text{kJ}}{\text{g}}$: Ein großer Teil der Wärme erwärmt die Luft, die Dose und das Thermometer. Für einen Vergleich verschiedener Brennstoffe mit derselben Anordnung reicht der Versuch trotzdem.

Sicherheit. Brennspiritus und Lampenöl sind entzündbar; Brenner nur kalt nachfüllen, Schutzbrille, feuerfeste Unterlage. Lampenöl kann beim Verschlucken in die Lunge gelangen und tödlich sein: Flasche sofort verschließen.

4.3 Die Kohlenstoffdioxidbilanz

Für das Klima zählt, wie viel Kohlenstoffdioxid entsteht, **bezogen auf die gewonnene Energie**. Denn man braucht eine bestimmte Energie, zum Beispiel zum Heizen eines Hauses, und will dafür möglichst wenig Kohlenstoffdioxid ausstoßen. Diese Größe heißt **Kohlenstoffdioxidbilanz** eines Brennstoffs; man gibt sie in Gramm Kohlenstoffdioxid je Kilojoule oder je Megajoule an.

Beispiel 5

Kohlenstoffdioxid je Kilojoule bei Methan. Nach der Reaktionsgleichung entsteht aus 1 mol Methan 1 mol Kohlenstoffdioxid, das sind $m = n \cdot M = 1\ \text{mol} \cdot 44{,}0\ \frac{\text{g}}{\text{mol}} = 44{,}0\ \text{g}$. Dabei werden 802,5 kJ frei:

$$\frac{44{,}0\ \text{g}}{802{,}5\ \text{kJ}} = 0{,}0548\ \frac{\text{g}}{\text{kJ}} = 54{,}8\ \frac{\text{g}}{\text{MJ}}$$

Bei Octan entstehen aus 1 mol Octan 8 mol Kohlenstoffdioxid (aus 2 mol werden 16 mol): $m = 8\ \text{mol} \cdot 44{,}0\ \frac{\text{g}}{\text{mol}} = 352\ \text{g}$ bei 5073,9 kJ, also

$$\frac{352\ \text{g}}{5073{,}9\ \text{kJ}} = 0{,}0694\ \frac{\text{g}}{\text{kJ}} = 69{,}4\ \frac{\text{g}}{\text{MJ}}.$$

Bei Kohlenstoff: $\frac{44{,}0\ \text{g}}{393{,}5\ \text{kJ}} = 0{,}112\ \frac{\text{g}}{\text{kJ}} = 112\ \frac{\text{g}}{\text{MJ}}$. **Bei Wasserstoff** entsteht kein Kohlenstoffdioxid.

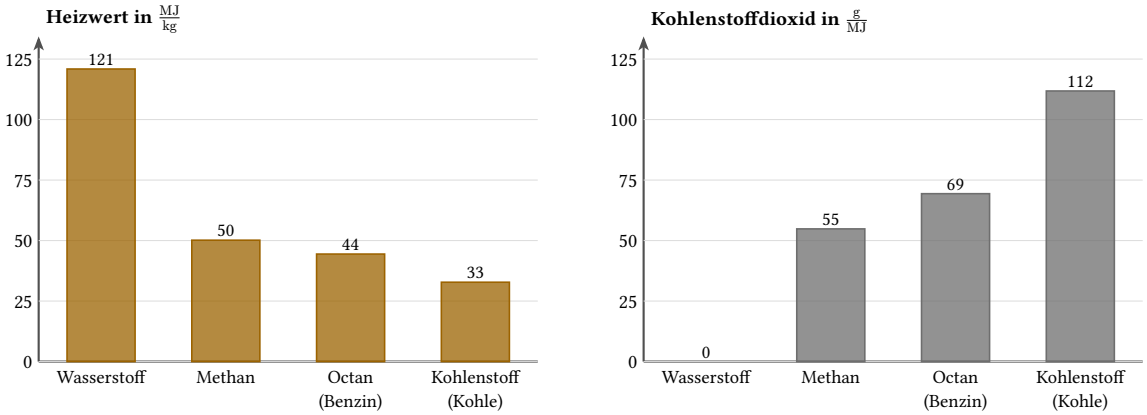


Abbildung 114: Heizwert (links) und entstehendes Kohlenstoffdioxid je Megajoule Wärme (rechts) für reine Brennstoffe, berechnet aus den Reaktionsgleichungen und den Werten in Tabelle 49.

Je mehr Wasserstoff ein Brennstoff im Verhältnis zum Kohlenstoff enthält, desto weniger Kohlenstoffdioxid entsteht je Energie: Ein Teil der Energie stammt dann aus der Verbrennung des Wasserstoffs zu Wasser, die kein Kohlenstoffdioxid liefert.

Echte Brennstoffe sind Gemische und enthalten oft Wasser, Asche oder gebundenen Sauerstoff. Für sie gibt es gemessene Durchschnittswerte (Tabelle 50).

Brennstoff	Heizwert in $\frac{\text{MJ}}{\text{kg}}$	Kohlenstoffdioxid in $\frac{\text{g}}{\text{MJ}}$
Erdgas	48,0	56,1
Benzin	44,3	69,3
Steinkohle	25,8	94,6
Braunkohle	11,9	101
Holz	15,6	112

Tabelle 50: Durchschnittswerte realer Brennstoffe (IPCC 2006 Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Band 2, Tabellen 1.2 und 1.4).

Die berechneten Werte für Methan und Octan stimmen gut mit denen für Erdgas und Benzin überein. Steinkohle setzt je Energie weniger Kohlenstoffdioxid frei als reiner Kohlenstoff, weil sie auch Wasserstoff enthält. Braunkohle hat einen kleinen Heizwert, weil sie viel Wasser enthält, das beim Verbrennen nur verdampft. Holz enthält schon viel gebundenen Sauerstoff, ist also gewissermaßen „teilweise verbrannt“, und liefert je Kohlenstoff-Atom weniger Energie.

4.4 Energieträger beurteilen

Energie und Kohlenstoffdioxid sind wichtige, aber nicht die einzigen Kriterien. Eine Beurteilung fragt auch: Wo kommt der Brennstoff her, und wie viel Energie kostet seine Herstellung? Lässt er sich gut speichern und transportieren? Welche anderen Schadstoffe entstehen? Ist er nachwachsend oder fossil?

Brennstoff	Vorteile	Nachteile
Wasserstoff	höchster Heizwert je Masse; beim Verbrennen und in der Brennstoffzelle nur Wasser	kommt nicht frei vor, muss hergestellt werden (heute meist aus Erdgas, dabei entsteht Kohlenstoffdioxid); wenig Energie je Volumen, schwer zu speichern; mit Luft explosiv
Methan (Erdgas)	wenig Kohlenstoffdioxid je Energie unter den fossilen Brennstoffen; sauber verbrennend	fossil; entweichendes Methan ist selbst ein starkes Treibhausgas
Benzin	viel Energie je Masse und je Volumen; flüssig, leicht zu tanken	fossil; Abgase wie Stickoxide und Feinstaub
Kohle	billig, in großen Mengen vorhanden	am meisten Kohlenstoffdioxid je Energie; Feinstaub und Schwefeldioxid; Tagebau zerstört Landschaften
Holz	nachwachsend; der Kohlenstoff stammt aus der Luft von heute	je Energie viel Kohlenstoffdioxid, das erst wieder gebunden ist, wenn Bäume nachgewachsen sind; Feinstaub

Tabelle 51: Brennstoffe im Vergleich.

Energie je Volumen

Für Fahrzeuge zählt neben der Masse auch der Platz im Tank. Ein Liter Benzin wiegt etwa 0,75 kg und liefert rund 33 MJ. Wasserstoff ist ein sehr leichtes Gas; selbst auf 700 bar zusammengepresst wiegt ein Liter nur etwa 40 g und liefert etwa 5 MJ, nicht einmal ein Sechstel davon. Wasserstofftanks sind deshalb groß, schwer und aufwendig gebaut.

Typischer Fehler

Falsch: Ein Wasserstoffauto ist immer klimaneutral, weil aus dem Auspuff nur Wasser kommt.
Richtig: Klimafreundlich ist es nur, wenn der Wasserstoff mit Strom aus Sonne, Wind oder Wasserkraft durch Elektrolyse hergestellt wurde (Skript C3, C7).

Heute wird Wasserstoff überwiegend aus Erdgas gewonnen; dabei entsteht Kohlenstoffdioxid an anderer Stelle. Bei Herstellung, Verdichten und Umwandlung geht außerdem Energie verloren.

Merksatz

Die **Reaktionsenergie** eines Brennstoffs gibt man als Heizwert oder Brennwert je Masse an. Die **Kohlenstoffdioxidbilanz** vergleicht die Masse Kohlenstoffdioxid mit der gewonnenen Energie; man berechnet sie aus der Reaktionsgleichung. Je Energie entsteht bei Kohle am meisten Kohlenstoffdioxid, bei Erdgas weniger, bei Wasserstoff gar keines, solange man seine Herstellung nicht mitrechnet.

Fachbegriffe: Energieträger · Wasserstoff · Methan · Benzin · Reaktionsenergie · Heizwert · Brennwert · Kohlenstoffdioxidbilanz · fossiler und nachwachsender Brennstoff

Üben: **noctua** ↗ Ausprobieren: **Kalorimeter** ↗ · **Energieversorgung im Vergleich** ↗

