

Der Brennwert von Kohle

Versuchsziele

- Kohle als Brennstoff kennenlernen.
- Den Brennwert von Kohle bestimmen.
- Kalorimetrie als Messverfahren kennenlernen.

Grundlagen

Kohle gehört neben Erdöl und Erdgas zu den wichtigsten fossilen Energieträgern. Fossile Kohle ist nichts anderes als ein Sedimentgestein von brauner bis schwarzer Farbe. Entstanden ist es im Laufe vieler Millionen Jahre aus Pflanzenresten. Die Entstehung von Steinkohle kann hauptsächlich zwei geologischen Zeitabschnitten zugeordnet werden, der Tertiärzeit sowie dem Karbon. In diesen Zeitabschnitten wurden riesige Wälder überschwemmt und von der Luft abgeschlossen, so dass es nicht zur normalen aeroben Verwesung kommen konnte. Über die Pflanzenreste lagerten sich verschiedene Gesteinsschichten und durch den dadurch entstandenen Druck und die hohen Temperaturen kam es zur Entstehung von Kohle. Dieser Vorgang wird auch als Inkohlung bezeichnet. Die erste Stufe der Inkohlung ist die Torfbildung, danach folgt Braunkohle- und Steinkohlebildung. Am weitesten fortgeschritten ist der Prozess der Inkohlung bei Anthrazit.

Kohle wird seit langem als Brennstoff verwendet. Die Verbrennungswärme wird dabei zum Heizen und der Gewinnung elektrischer Energie in Kraftwerken genutzt. Kohle kann auch

als Ausgangsbasis für alle aus Erdöl gewonnenen Rohstoffe genutzt werden. Dazu bedarf es verschiedener Verfahren der Kohleveredlung, z.B. die Verkokung, Kohlevergasung und Kohlehydrierung.

Der Heizwert von Kohle kann mit Hilfe des Verfahrens der Kalorimetrie bestimmt werden. Die Verbrennung findet dabei in einem geschlossenen System statt, in dem die gesamte Wärmeenergie aufgenommen werden kann. Der Heizwert einer Steinkohleeinheit wird als Vergleichswert herangezogen, um andere Brennstoffe zu bewerten.

Ein Kilogramm einer Steinkohleeinheit entspricht einer Energiemenge von exakt 7000 kcal/kg. Diese wird frei, wenn 1 kg einer (hypothetischen) Steinkohle verbrennen. Dies entspricht 29,3076 MJ/kg.

In diesem Versuch wird der Brennwert von Kohle ermittelt. Hierzu wird als Kalorimeter ein doppelwandiges Glasgerät benutzt, das mit Wasser gefüllt wird und in das Rührer und Thermometer eintauchen. Eine Glaswendel sorgt für den Wärmeaustausch zwischen Verbrennungsgasen und Wasser, so dass die freiwerdende Energie vollständig auf das Wasser übertragen werden kann. Gemessen wird dann die Temperaturänderung des Wassers.







Abb. 1: Versuchsaufbau.

Gefährdungsbeurteilung

Natronlauge und Schwefelsäure sind ätzende Stoffe. Schutzkleidung (Kittel, Schutzbrille) tragen. Die Gaswaschflaschen vorsichtig füllen und dabei Handschuhe tragen.

Der Versuch muss nicht unter dem Abzug durchgeführt werden, weil die Verbrennung kontrolliert abläuft und die Abgase zusätzlich gefiltert werden.

Bitte Gebrauchsanweisungen beachten.

Natronlauge, 1 mol/l	
 <p>Signalwort: Gefahr</p>	<p>Gefahrenhinweise</p> <p>H314 Verursacht schwere Verätzungen der Haut und schwere Augenschäden.</p> <p>Sicherheitshinweise</p> <p>P280 Schutzhandschuhe / Schutzkleidung / Augenschutz / Gesichtsschutz tragen.</p> <p>P301+P330+P331 BEI VERSCHLUCKEN: Mund ausspülen. KEIN Erbrechen herbeiführen.</p> <p>P305+P351+P338 BEI KONTAKT MIT DEN AUGEN: Einige Minuten lang behutsam mit Wasser spülen. Vorhandene Kontaktlinsen nach Möglichkeit entfernen. Weiter spülen.</p>
Schwefelsäure, konz.	
 <p>Signalwort: Gefahr</p>	<p>Gefahrenhinweise</p> <p>H314 Verursacht schwere Verätzungen der Haut und schwere Augenschäden.</p> <p>H290 Kann gegenüber Metallen korrosiv sein.</p> <p>Sicherheitshinweise</p> <p>P280 Schutzhandschuhe / Schutzkleidung / Augenschutz / Gesichtsschutz tragen.</p> <p>P301+P3330+P331 Bei Verschlucken: Mund ausspülen. Kein Erbrechen herbeiführen.</p> <p>P309 Bei Exposition oder Unwohlsein:</p> <p>P310 Sofort GIFTINFORMATIONSZENTRUM oder Arzt anrufen</p> <p>P305+P351+P338 Bei Kontakt mit den Augen: Einige Minuten lang behutsam mit Wasser spülen. Vorhandene Kontaktlinsen nach Möglichkeit entfernen. Weiter spülen.</p>
Sauerstoff	
  <p>Signalwort: Gefahr</p>	<p>Gefahrenhinweise</p> <p>H270 Kann Brand verursachen oder verstärken; Oxidationsmittel.</p> <p>H280 Enthält Gas unter Druck; kann bei Erwärmung explodieren.</p> <p>Sicherheitshinweise</p> <p>P244 Druckminderer frei von Fett und Öl halten.</p> <p>P220 Von brennbaren Materialien entfernt aufbewahren.</p> <p>P370+P376 Bei Brand: Undichtigkeit beseitigen, wenn gefahrlos möglich.</p> <p>P403 An einem gut belüfteten Ort aufbewahren.</p>

Geräte und Chemikalien

1 Kalorimeter für Feststoffe, CPS.....	666 429
1 Profilrahmen C100, zweizeilig, für CPS....	666 428
2 Magnet-Hafttafel, 300 mm.....	666 4660
4 Halter, magnetisch, Gr. 4, 27...29 mm.....	666 4664
1 Konsole	301 312
1 Geräteplattform 350 mm	726 21
3 Glasverbinder, 2 x GL18	667 312
1 Sensor-CASSY.....	524 013
1 CASSY Lab 2	524 220
1 Temperaturfühler NiCr-Ni, 1,5 mm	529 676
1 NiCr-Ni-Adapter S	524 0673
4 Gaswaschflaschen-Unterteil.....	664 800
4 Glasrohreinsatz mit geradem Stiel	664 805
4 Schliffklemme, aus Satz 10	665 392ET10
1 DC-Netzgerät 0...16 V/0...5 A.....	521 546
1 Kleinspannungsstelltrafo	521 231
1 Rühraufsatz mit GL32-Gewinde	666 819
3 Experimentierkabel 19 A, 50 cm, rot/blau.....	501 45
1 Gummischlauch 8 mm Ø, 1 m.....	667 180
1 Silikonschlauch 4 mm Ø, 1 m.....	667 197
1 Schlauchverbinder, gerade, 4/15 mm Ø...604	510
1 Mörser, 70 mm Ø	667 092
1 Pistill, Länge 52 mm.....	608 360
1 Kompaktwaage, 3000 g : 0,1 g.....	ADAHCB3001
1 Kompaktwaage, 200 g : 0,01 g.....	667 7977
1 Feinregulierungsventil zu Minicandosen ..660	980
1 Minican-Druckgasdose Sauerstoff.....	660 998
1 Natronlauge, 1 mol/l, 500 ml	673 8420
1 Schwefelsäure, 95-98 %, 250 ml.....	674 7850
1 Steinkohle, Stücke, 100 g.....	674 9340
1 Schliff-Fett	661 082

Zusätzlich erforderlich:
PC mit Windows XP/Vista/7/8
kleiner Schraubenzieher (Kreuz)

Versuchsaufbau und -vorbereitung

Der Aufbau der Apparatur erfolgt analog zur Abbildung 1. Vor und hinter dem Kalorimeter werden je zwei Gaswaschflaschen angebracht. Die jeweils linken Flaschen dienen dabei leer als Sicherheitsflaschen. Die jeweils rechten Flaschen sind zum Reinigen der Gase mit Flüssigkeiten gefüllt. Der Sauerstoff wird durch konz. Schwefelsäure geleitet, um Wasser zu entfernen. Die Abgase werden durch Natronlauge geleitet, um das entstehende CO₂ zu absorbieren.

Aufbau der Apparatur

1. Die CPS-Apparatur wie in Abbildung 1 aufbauen.
2. Das Glasgefäß des Kalorimeters auf die Bodenplatte der CPS-Platte setzen. Es schließt mit einer Gummischwamm-dichtung.

Hinweis: Ein wenig Schliff fett auf die Gummischwamm-dichtung auftragen. Dies verhindert, dass auch bei größeren Druckschwankungen kein Gasaustausch zwischen Innenraum und Atmosphäre stattfindet.

Der Versuch kann auch mit Stativmaterial aufgebaut werden. (vgl. C 4.3.3.1)

Vorbereitung der Gasleitung

1. Auf die Sauerstoffgasflasche wird das Feinregulierungsventil aufgeschraubt. Dieses wird über einen schmalen Schlauch über einen Schlauchverbinder mit einem breiteren Schlauch und dieser dann mit der ersten Waschflasche verbunden. Dabei muss das Glasrohr der Gaswaschflasche in Richtung der zweiten Gaswaschflasche zeigen.
2. Die erste Gaswaschflasche mit der zweiten Gaswaschflasche über einen Glasverbinder verbinden.

3. In die zweite Waschflasche ca. 3 cm hoch Schwefelsäure füllen. Die Schwefelsäure wird zur Trocknung des Sauerstoffgases verwendet. Diese Waschflasche wird mit der Schlaucholive an der Bodenplatte des Kalorimeters verbunden.

Achtung: Vorsicht beim Einfüllen der Schwefelsäure. Handschuhe tragen! Unbedingt darauf achten, die Gaswaschflasche korrekt anzuschließen, damit die Waschflüssigkeit nicht gasstromaufwärts zurückgesaugt wird.

4. Die dritte Waschflasche bleibt wiederum leer. In die vierte Waschflasche wird ca. 3 cm hoch Natronlauge eingefüllt. Die dritte Flasche wird mit der Schlaucholive oben am Kalorimeter mit einem Glasverbinder verbunden. Dabei muss das Glasrohr der Gaswaschflasche in Richtung der vierten Gaswaschflasche zeigen.

Achtung: Vorsicht beim Einfüllen der Natronlauge. Handschuhe tragen! Außerdem unbedingt darauf achten, die Gaswaschflasche korrekt anzuschließen, damit die Waschflüssigkeit nicht gasstromaufwärts zurückgesaugt wird.

5. Die dritte und vierte Waschflasche mit einem Glasverbinder verbinden.

Vorbereitung des Kalorimeters

1. Das Glasgefäß des Kalorimeters leer wiegen. Den Wert $m(\text{Kalorimetergefäß leer})$ in die Tabelle (siehe unten) eintragen. Wasser in das Glasgefäß einfüllen und erneut wiegen. Den Wert $m(\text{Kalorimetergefäß gefüllt})$ in die Tabelle eintragen.

2. Das Glasgefäß auf die Bodenplatte setzen.

3. Den NiCr-Ni-Temperaturfühler in das Kalorimeter einführen und mit dem NiCr-Ni-Adapter verbinden. Diesen auf das Sensor-CASSY (Eingang A) stecken.

4. Den Rührer auf das Gewinde des Kalorimeters schrauben und mit Experimentierkabeln mit dem Kleinspannungsstelltrafo verbinden (Farbkodierung beachten).

5. Das Thermometer wird in eine Position gebracht, in der es nicht die Glaswand berührt und genügend Abstand zum Rührer besteht.

Vorbereitung der Probe

1. Etwa 1 bis 2 Stücke der Steinkohle in einen Mörser geben.

2. Die Steinkohle mit Hilfe des Pistills zerkleinern, so dass die Oberfläche zum Entzünden vergrößert wird und ein besserer Kontakt mit der Glühwendel sichergestellt werden kann.

3. Den Tiegel mit der zerkleinerten Steinkohle ca. zur Hälfte füllen. Den gefüllten Tiegel wiegen und den Wert $m(\text{Tiegel vor dem Versuch})$ in die Tabelle eintragen.

4. Glühwendel abschrauben und Tiegel in den Halter einhängen.

5. Glühwendel wieder einsetzen, so dass sie die Steinkohle berührt.

Versuchsdurchführung


1. [Einstellungen in CASSY-Lab laden](#).

2. Für die Zündung eine Spannung von ca. 9 V und eine Stromstärke von 5 mA am DC-Netzgerät einstellen und das Netzgerät bis zur Zündung wieder ausschalten.

Hinweis: Beim Einstellen der Werte darf das Netzgerät nicht mit dem Kalorimeter verbunden sein.

3. Zu Beginn den Sauerstoffstrom etwas höher einstellen, damit die gesamte Apparatur gut gefüllt wird. Nach etwa 30 Sekunden auf einen Durchfluss von 2 Blasen pro Sekunde einstellen.

4. Die Aufnahme der Werte in CASSY Lab 2 jetzt starten und den Rührer einschalten.

5. Der Mittelwert der Anfangstemperatur nach ca. 4 und 5 Minuten wird als Ausgangswert für die spätere Berechnungen genommen und in die Tabelle eingetragen (T_1). Dafür in CASSY Lab im Kontextmenü  **Mittelwert einzeichnen** verwenden.

6. Die Zündung des Verbrennungsgutes erfolgt elektrisch. Dazu das Kalorimeter mit Kabeln mit dem Netzgerät verbinden (siehe Abb. 1) und das Netzgerät einschalten.

7. Die Zündzeit sollte 5 – 10 Sekunden betragen. Stromstärke I und Spannung U notieren. Danach das Netzgerät ausschalten. Die Zündzeit aus dem Diagramm der Spannung in CASSY Lab 2 entnehmen und alle Werte in die Tabelle eintragen.

8. Nach 5 min den Sauerstoffstrom abstellen und nach weiteren 5 min die Aufnahme der Messwerte stoppen. Die Endtemperatur T_2 wird wiederum über einen Mittelwert aus den letzten Minuten bestimmt und in die Tabelle eingetragen.

9. Sobald der Tiegel abgekühlt ist, diesen Tiegel aus dem Kalorimetergefäß entnehmen, wiegen und Wert $m(\text{Tiegel nach dem Versuch})$ in Tabelle eintragen.

Beobachtung

Fließt durch die Glühwendel elektrischer Strom, so glüht sie orange. Nach kurzer Zeit beginnt auch ein Teil der Steinkohle zu glühen. Nach Abschalten des Sauerstoffstromes erlischt diese jedoch wieder. Nach dem Erlöschen wird das Wasser im Kalorimeter noch mindestens weitere 5 min gerührt, bis kein Temperaturanstieg mehr zu beobachten ist.

Es verbrennt nur sehr wenig Steinkohle während des Versuches.

Auswertung

Der Brennwert kann aus dem Temperaturanstieg berechnet werden (siehe Abb. 2). Dafür werden in die CASSY-Lab Datei als Mittelwerte die Anfangstemperatur T_1 und die Endtemperatur T_2 eingezeichnet.

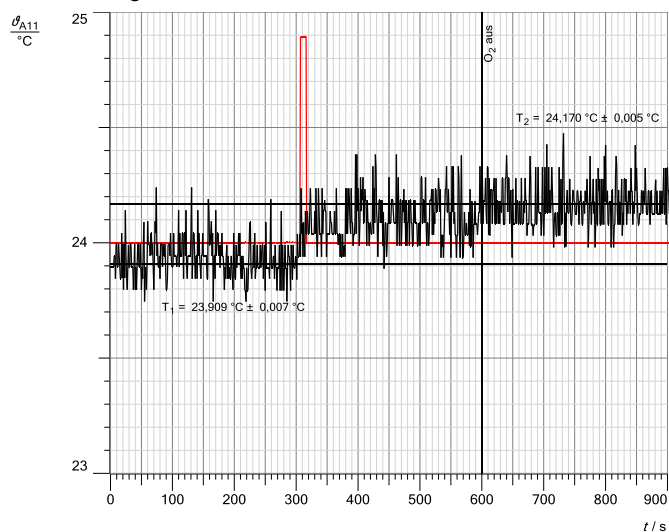


Abb. 2: Temperatur- und Spannungsmessung während der Verbrennung von Steinkohle. Schwarz: Temperatur, rot: Spannung.

Berücksichtigt werden müssen die Wärmekapazität des Kalorimeters und die zugeführte Zündenergie. Alle ermittelten Werte sind in Tabelle 1 zusammengetragen.

Tab. 1: Während des Versuchs ermittelte Werte.

Benötigte Daten	Werte
$m(\text{Tiegel vor dem Versuch})$	20,21 g
$m(\text{Tiegel nach dem Versuch})$	20,19 g
$m(\text{verbrannte Steinkohle})$	0,02 g
Anfangstemperatur T_1	23,91 °C
Endtemperatur T_2	24,17 °C
Temperaturdifferenz ΔT	0,26 K
$m(\text{Kalorimetergefäß leer})$	693,6 g
$m(\text{Kalorimetergefäß gefüllt})$	1391,2 g
$m(\text{Wasser})$	687,6 g
$I_{\text{Zünd}}$	4,6 A
$U_{\text{Zünd}}$	8,9 V
$t_{\text{Zünd}}$	10 s

Berechnung der spezifischen Wärmekapazität des Kalorimeters $C_{\text{Kalorimeter}}$

Das Kalorimeter besteht hauptsächlich aus Glas und Wasser. Alle anderen Komponenten (Rührer, Temperaturfühler) werden nicht berücksichtigt. Aus Tabellenwerken können die spezifischen Wärmekapazitäten für Glas und Wasser entnommen werden.

$$c_{\text{Glas}} = 0,800 \text{ J/g}\cdot\text{K} \text{ und } c_{\text{Wasser}} = 4,185 \text{ J/g}\cdot\text{K}$$

Die Wärmekapazität des Kalorimeters $C_{\text{Kalorimeter}}$ wird vereinfacht als gewichtete Summe aus den Wärmekapazitäten von Glas und Wasser berechnet.

$$\begin{aligned} C_{\text{Kalorimeter}} &= m(\text{Kalorimeter leer}) \cdot c_{\text{Glas}} + m(\text{Wasser}) \cdot c_{\text{Wasser}} \\ &= 693,6 \text{ g} \cdot 0,800 \text{ J/g}\cdot\text{K} + 687,6 \text{ g} \cdot 4,185 \text{ J/g}\cdot\text{K} \\ &= 3433 \text{ J/K} \end{aligned}$$

Aus Eichversuchen wurde für das Kalorimeter ein Wirkungsgrad $\eta = 0,810$ ermittelt. Dieser Wert ist der Gebrauchsanweisung des Kalorimeters entnommen und ist eine gerätespezifische Konstante. Der Wirkungsgrad wird mit der Wärmekapazität des Kalorimeters verrechnet. So erhält man eine effektive Wärmekapazität C_{eff} .

$$C_{\text{eff}} = \frac{C_{\text{Kalorimeter}}}{\eta_{\text{Kalorimeter}}} = \frac{3433 \text{ J/K}}{0,810} = 4238 \text{ J/K}$$

Berechnung der Verbrennungsenthalpie von Steinkohle

Die Verbrennungsenthalpie wird mit folgender Formel berechnet:

$$\begin{aligned} -\Delta H &= C_{\text{eff}} \cdot \Delta T \\ -\Delta H &= 4238 \frac{\text{J}}{\text{K}} \cdot 0,261 \text{ K} \\ -\Delta H &= 1106 \text{ J} \end{aligned}$$

Von dieser Verbrennungsenthalpie wird die (zugegebene) Zündenergie $E_{\text{Zünd}}$ in Joule abgezogen. Diese setzt sich aus der Spannung U , der Stromstärke I und der Zündzeit t zusammen:

$$\begin{aligned} E_{\text{Zünd}} &= U_{\text{Zünd}} \cdot I_{\text{Zünd}} \cdot t_{\text{Zünd}} \\ &= 8,9 \text{ V} \cdot 4,6 \text{ A} \cdot 10 \text{ s} \end{aligned}$$

$$= 409 \text{ J}$$

Der Wert für die Zündenergie wird von der vorher berechneten Reaktionsenthalpie $-\Delta H$ abgezogen.

$$-\Delta H_{\text{Korr}} = -\Delta H - E_{\text{Zünd}} = 1106 \text{ J} - 409 \text{ J} = 697 \text{ J}$$

Bei der Verbrennung von 25 mg Steinkohle wurde also eine Energie von 697 J freigesetzt.

Berechnung des Brennwertes von Steinkohle

Die Reaktionsenthalpie wurde nun um alle relevanten Werte korrigiert. Es kann jetzt der Brennwert der Steinkohle berechnet werden. Dies ist die Reaktionsenthalpie $-\Delta H$ für eine definierte Menge, z.B. 1 g.

$$\text{Brennwert} = \frac{-\Delta H}{m(\text{verbr. Steinkohle})}$$

$$\text{Brennwert} = \frac{697 \text{ J}}{0,02 \text{ g}}$$

$$\text{Brennwert} = 34,9 \frac{\text{kJ}}{\text{g}} = 34,9 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}}$$

Der Brennwert dieser Steinkohle beträgt 34,9 MJ/kg.

Ergebnis

In diesem Versuch wurde der Brennwert von Steinkohle mit Hilfe eines Kalorimeters bestimmt. Das Kalorimeter dient dabei als geschlossenes System, in dem die Verbrennung stattfindet. Durch die Verbrennung kommt es in diesem System zu einem Temperaturanstieg. Mit der dadurch erhaltenen Temperaturdifferenz kann dann der Brennwert der Steinkohle berechnet werden.

Der im Versuch ermittelte Brennwert kann mit dem in der Literatur bekannten Brennwert verglichen werden. Außerdem kann berechnet werden, wie vielen Steinkohleeinheiten die hier freigewordene Energiemenge entspricht. Der erhaltene Brennwert beträgt ca. 34,9 MJ/kg. Im Vergleich zum Literaturwert (ca. 32 MJ/kg.) entspricht dies einer Abweichung von ca. 9 % und ist aufgrund der Methodik zu erwarten. Diese setzt sich aus Wärmeverlusten zusammen, die sich aus der Erwärmung der Bodenplatte und nicht vollständiger Wärmeübertragung von Verbrennungsgas auf die Wärmeaustauscherspirale, sowie Wärmeübergang von Kalorimeter an die Atmosphäre und das Stativmaterial ergeben.

Der Brennwert der im Versuch verwendeten Steinkohle beträgt 34,9 MJ/kg. Eine Steinkohleeinheit entspricht 29,3076 MJ/kg. Somit entspricht dies für die verwendete Steinkohle 1,2 Steinkohleeinheiten.

Mit dieser Methode lassen sich auch die Brennwerte anderer Brennstoffe bestimmen.

Reinigung und Entsorgung

Die Asche der Steinkohle kann im normalen Hausmüll entsorgt werden. Nicht verbrannte Steinkohle kann erneut verwendet werden.

Schwefelsäure und Natronlauge können in dafür gekennzeichneten Gefäßen für weitere Versuche aufbewahrt werden. Sollen sie entsorgt werden, ggf. neutralisieren und mit viel Wasser in den Abfluss geben.