



**Bioabfall von heute –**

**Energieversorgung von**

**morgen?**

**Soraya Cornelius**

Referendarin am Gymnasium im Bildungszentrum Reutlingen-Nord

„Die Arbeit mit Kindern und Jugendlichen und dabei vor allem auch die Wissensvermittlung hat mir schon immer sehr große Freude bereitet. Im Lehrerberuf kann ich dies mit meinem Interesse an Naturwissenschaft und Technik verbinden. Mein Ziel ist es, mit meinem zukünftigen Unterricht bei den Schülerinnen und Schülern das Interesse für die Naturwissenschaften und für die naturwissenschaftlichen Berufe zu wecken.“





**Klassenstufe:** 8–10

**Fächer:** Chemie, Physik, Technik, Naturwissenschaften

**Zeitlicher Rahmen der Einheit:** 3 Doppelstunden (3-mal 90 Min.)

**Schlüsselwörter:** Biogas, Energieumwandlung, erneuerbare Energien, Stirlingmotor, Energiedichte

**Bezug zum Lehrplan:** Nachhaltigkeit; ethische, ökologische und wirtschaftliche Auseinandersetzung mit erneuerbarer Energie; Kohlenwasserstoffe als Energieträger; Kohlenstoffkreislauf und nachwachsende Rohstoffe; Energieumwandlung; Energieeffizienz; technische Umsetzung einer Biogasanlage; Optimierung eines Prozesses

**Erforderliche Vorkenntnisse:** Grundlagen zur Energieumwandlung; Grundlagen zur organischen Chemie vorteilhaft

## Kurzbeschreibung

In dieser Unterrichtseinheit wird der Frage „Ist der Bioabfall von heute die Energieversorgung von morgen?“ nachgegangen. Gemeinsam mit den Schülern wird erarbeitet, ob die Biogasherstellung eine Alternative zu den fossilen Brennstoffen darstellt. Hierfür ist die Unterrichtseinheit in drei aufeinander aufbauende Blöcke mit unterschiedlichen Schwerpunkten aufgeteilt:

- A** Entstehung von Biogas: Diskussion z. B. ethische Aspekte, Theorie der Biogasentstehung, Versuch zur Biogasherstellung
- B** Bestimmung der Energiedichte: Kennenlernen der Wärmekapazität, Bestimmung der Energiedichte des hergestellten Biogases
- C** Stirlingmotor: Aufbau und Funktionsweise

## Ablauf

### A · Entstehung von Biogas

**Eingangsthese:** Der Bioabfall von heute ist die Energieversorgung von morgen.

**Schülerauftrag:** Diskutiert bitte in Partnerarbeit, was ihr von dieser These haltet! Handelt es sich hierbei nur um eine Träumerei oder kann das die Wirklichkeit sein? Stimmt ab und tragt es in die jeweilige Spalte ein (siehe rechts, TAFELBILD).

Anschließend werden die Ergebnisse gemeinsam besprochen.

- ?** Wie kann ich überhaupt Bioabfall in nutzbare Energie umwandeln? Warum denkt ihr, dass es die Wirklichkeit bzw. eine Träumerei ist?

**ARBEITSMATERIAL A1** (Seite 11) wird gezeigt.

Was machen diese Texte deutlich?

Der erste Teil zeigt das Potenzial, das in unserem Abfall steckt. Das Interview dagegen macht deutlich, dass es auch ausreichend Material geben muss, mit dem eine Biogasanlage „gefüttert“ werden kann.

Zusätzlich kann hier auf die ethische Frage eingegangen werden: Verbrennen wir das Essen Anderer?

- ?** Was haltet ihr jetzt von der Produktion von Biogas? Ist es wichtig, die Produktion von Biogas weiter zu fördern?

Eine Weiterentwicklung der erneuerbaren Energien ist unerlässlich (Klimawandel, Abnahme der Ressourcen an fossilen Brennstoffen).

- ?** Welche Materialien eignen sich besonders gut zur Herstellung von Biogas?


### Tafelbild

Der Bioabfall von heute ist die Energieversorgung von morgen.

Wirklichkeit

Träumerei

Die Schüler sollen durch wissenschaftliches Arbeiten herausfinden, was sich besonders gut zur Herstellung von Biogas eignet. Dazu müssen die Grundlagen der Biogasproduktion vermittelt werden.

Besprechung der einzelnen Entstehungsschritte ( **ARBEITSMATERIALIEN A2 BIS A4** auf Seiten 12 bis 14).

### **Versuch: Herstellung von Biogas**

( **ARBEITSMATERIAL A4** auf Seite 14)

**Hinweis:** Da die Herstellung von Biogas einige Tage dauert, müssen Sie sicherstellen, dass Sie die Versuchsaufbauten über mehrere Tage stehen lassen können.


Nun beginnen die Schüler in Teams von drei bis vier Personen mit der Produktion von Biogas. Dazu sollen sie sich überlegen, welche Materialien sie verwenden wollen und warum (eine Auswahl von Materialien sollte ausliegen).

**Mögliche Materialien:** Milch, altes Brot, Kartoffelschalen, Zwiebelschalen, Karottenschalen, Grasschnitt, Fette, Apfelschalen, Mais, Salat, Maissilage, Grassilage

**Bakterien:** Teichwasser (mit Grünalgen) und/oder Rindergülle und/oder Pansenmaterial (vom Schlachthof) und/oder Klärwasser

**Wichtig:** Um Frustration bei den Schülern zu vermeiden, sollte nach der Entscheidung über die verwendeten Materialien eine kurze Absprache mit der Lehrkraft erfolgen, damit im Notfall, wenn die Produktion augenscheinlich nicht funktionieren wird, (z. B. die Bakterien fehlen) eingegriffen werden kann. Eventuell sollte hier eine Begrenzung an eingesetztem Material pro Gruppe vorgenommen werden, um später einen Vergleich der unterschiedlichen eingesetzten Substrate hinsichtlich der Energiedichte und Methanmenge vornehmen zu können.

Die Mengen der eingesetzten Materialien müssen abgewogen und notiert werden. Diese Werte werden für den Vergleich der eingesetzten Substrate benötigt.


Das angesetzte Gemisch muss zunächst eine Weile erhitzt werden. Während dieser Zeit könnte ein Arbeitsblatt zur Biogasanlage bearbeitet werden ( **ARBEITSMATERIAL A5**, Seite 15). Darauf sollen die einzelnen Komponenten der Biogasproduktion in einer Biogasanlage beschriftet werden. Außerdem können die Schüler vergleichen, welche Bauteile den im Versuch verwendeten Teilen entsprechen.


Gemeinsames Aufräumen und Ende der ersten Doppelstunde.


## **B · Bestimmung der Energiedichte**

Zu Beginn wird erneut die These zu sehen sein: Der Bioabfall von heute ist die Energieversorgung von morgen.


Es erfolgt die Auswertung der letzten Stunde, in der das Gärsubstrat angesetzt wurde. Ist Gas entstanden? Um herauszufinden, ob das entstandene Gas energiereich ist, wird die Energiedichte ermittelt.


 Was genau wird mit der Energiedichte angegeben?


 Mit der Energiedichte gibt man den Energiegehalt pro Volumen ( $\text{kJ}/\text{cm}^3$ ) eines Stoffes an.


Wie kann der Energiegehalt bestimmt werden? Um die Energiedichte bestimmen zu können, wird die spezifische Wärmekapazität benötigt ( **ARBEITSMATERIAL B1**, Seite 16).

Versuchsaufbau wird gezeigt ( **ARBEITSMATERIAL B1**, Seite 16).


 Welcher der Stoffe, die in der Übersicht für die spezifischen Wärmekapazitäten aufgeführt sind, eignet sich eurer Meinung nach zur Messung der Temperaturerhöhung am besten und warum?

 Wasser (günstig, ungefährlich, Umrechnungsfaktor von Volumen auf Masse (Dichte = ca.  $1 \text{ kg}/\text{dm}^3$ ))

 Könnt ihr euch vorstellen wie diese Apparatur funktioniert?

Durchführung des Versuchs zur Bestimmung der Energiedichte ( **ARBEITSMATERIAL B3**, Seite 18).

### **Wichtige Hinweise:**

- In das Glasröhrchen, an dem das Gas entzündet wird, wird als Rückschlagschutz etwas Eisenwolle hineingegeben.
- Schutzbrille tragen! 

### **Versuch: Energiedichtemessung**

Bei geschlossenem Hahn wird Wasser in den Scheidetrichter eingefüllt und dieser mit dem Schlauch verbunden. Dabei wird etwas mehr Wasser genommen, als entstandenes Gas vorliegt. In einen Erlenmeyerkolben werden 100 ml Wasser gegeben und mit einem Lochstopfen mit Thermometer verschlossen. Der Erlenmeyerkolben mit dem Methangas wird mit einem Zweifach-Lochstopfen verschlossen und aus dem Wasserbad genommen. In dem ersten Loch des Stopfens ist ein Glasröhrchen und in dem anderen ein Glasröhrchen mit

einer verengten Spitze, welches mit Eisenwolle als Rückschlagschutz gefüllt ist. Der Schlauch wird ganz schnell über das Glasröhrchen gezogen und der Hahn des Scheidetrichters leicht geöffnet, sodass das Wasser in den Erlenmeyerkolben und ein konstanter Strom an Methangas aus dem zweiten Röhrchen des Erlenmeyerkolbens fließt, welcher möglichst schnell angezündet wird. Das Wasser verdrängt also das Methangas aufgrund der geringeren Dichte des Gases aus dem Erlenmeyerkolben.

Der obere Erlenmeyerkolben stellt dabei das Kalorimeter dar. Hierfür werden die Anfangstemperatur des Wassers vor dem Entzünden und die Endtemperatur (maximale Temperatur) notiert und daraus dann die Energiemenge und die Energiedichte berechnet.

**Berechnung der Energiedichte** (ARBEITSMATERIAL B4, Seite 19). Falls Hilfe nötig ist: siehe Hinweise, ebenfalls auf Seite 19. Während der Versuchsdurchführung wird das ARBEITSMATERIAL B2 (Seite 17) durchgegeben. Darauf wird die Zusammensetzung des Substrats notiert.

**Vergleich** der Berechnung: Sammeln und Vergleichen der Ergebnisse.

? Wie kommen so unterschiedliche Ergebnisse zustande?

- ➔ Biogas setzt sich aus unterschiedlichen Bestandteilen zusammen (Tabelle auf ARBEITSMATERIAL B2, Seite 17).
- ➔ Dies ist abhängig vom Gärsubstrat (Beispiele auf ARBEITSMATERIAL B2, Seite 17).

**Die Energiedichte hängt direkt vom Methangehalt ab.**

Energiedichte von Methan:  $33\,480\text{ kJ/cm}^3$

- ➔ Wie viel Methan enthielt das Biogas der Schüler?

### Weitere mögliche Aufgabe:

Vergleich des Kohlenstoffkreislaufs bei der Verwendung von Methan aus Erdgas bzw. Methan aus Biogas.

## C · Stirlingmotor – Umwandlung der thermischen in elektrische Energie

Der Weg vom Biogas zur nutzbaren Energie: Mit Biogas können Strom und Wärme erzeugt werden. Eine Möglichkeit ist der Stirlingmotor.

Biogas-Verbrennung ➔ Wärme ➔ Strom

Vorführung eines Stirlingmotors und/oder Aufzeigen der Funktionsweise.

Um das Prinzip des Stirlingmotors verstehen zu können, werden zunächst einige Grundlagen angeschaut:

- Kompression und Expansion (ARBEITSMATERIAL C1, Seite 20)
- Aufbau und Funktionsweise des Stirlingmotors (ARBEITSMATERIAL C2, Seite 21)
- Funktionsweise des Stirlingmotors in vier Phasen (ARBEITSMATERIALIEN C3 + C4, Seite 22–23)

### Der Stirlingmotor

Robert Stirling (\*1790; † 1878), schottischer Priester und Ingenieur, gilt zusammen mit seinem jüngeren Bruder James als Erfinder des nach ihnen benannten Heißluftmotors. Bereits 1816 meldete er ihn zum Patent an. In den folgenden Jahren entwickelten die Brüder ihre Maschine weiter. Sie wollten damit eine Alternative zu Hochdruckdampfmaschinen bieten, die immer wieder zahlreiche Opfer durch Kesselexplosionen forderten. Ende des 19. Jahrhunderts diente der Stirlingmotor in vielen Privathaushalten als Antrieb für Ventilatoren oder auch kleine Zimmerspringbrunnen. Später wurde er als Generator zum Betrieb von Röhrenradios genutzt. Allerdings wurde der Motor immer mehr von Otto- und Dieselmotoren verdrängt. Bis heute wurde der Motor durch zahlreiche Ingenieure und Techniker weiterentwickelt. Er wird z. B. in kleineren Blockheizkraftwerken, in solarthermischen Anlagen oder auch in U-Booten eingesetzt.

Quellen:  
Schleder, Frank (2011), Stirlingmotoren. Vogel Buchverlag, Würzburg. S. 152.  
Stempel, Ulrich E. (2010), Experimente mit dem Stirlingmotor. Franzis Verlag GmbH, Poing. S. 11.

Der Ablauf in einem Stirlingmotor wird in vier Phasen eingeteilt. Mit den Schülern wird die erste Phase gemeinsam besprochen und beschriftet. Danach beschäftigen sich die Schüler in Gruppen jeweils mit einer Phase, beschreiben diese und erklären den Vorgang. Die Ergebnisse werden zusammengetragen, sodass der vollständige Kreislauf des Stirlingmotors zu sehen ist.

Zusammenfassend kann ein Kurzfilm zur Funktionsweise des Stirlingmotors gezeigt werden.

Eine vereinfachte Beschreibung der Phasen im Stirlingmotor finden Sie im **ARBEITSMATERIAL C4** auf Seite 23.

**?** Wie lässt sich aber letztendlich mithilfe der Drehung des Schwungrades Strom gewinnen?

**!** Mit dem Stirlingmotor wird Wärmeenergie in Bewegungsenergie umgewandelt. Mithilfe eines elektrischen Generators kann diese Bewegungsenergie in Strom umgewandelt werden. Unter [www.science-on-stage.de/biogas](http://www.science-on-stage.de/biogas) finden Sie Arbeitsmaterial zur Funktionsweise eines Generators.

**?** Mit welchen emissionsfreien Alternativen zum Biogas könnte man so einen Stirlingmotor noch betreiben?

- Sonne
- radioaktive Zerfallswärme
- heißes Wasser oder Dampf aus der Geothermie

#### Zusatz:

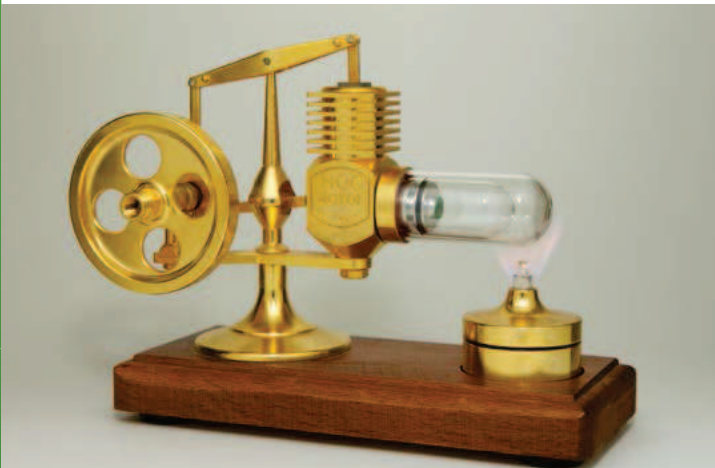
Bis jetzt wurde der Stirlingmotor als Wärmepumpe betrachtet. Das heißt, dem Stirlingmotor wird Wärme zugeführt (die Wärmequelle besitzt eine höhere Temperatur als die Umgebung). Die Luft erwärmt sich an der unteren Seite des Stirlingmotors und kühlt sich an der oberen Seite maximal auf die Umgebungstemperatur ab.

Der Stirlingmotor kann aber auch als Kältemaschine eingesetzt werden. Dabei wird die untere Seite des Stirlingmotors gekühlt. Die Luft kühlt sich also an dieser Seite ab und wärmt sich an der oberen maximal bis auf die Umgebungstemperatur auf.

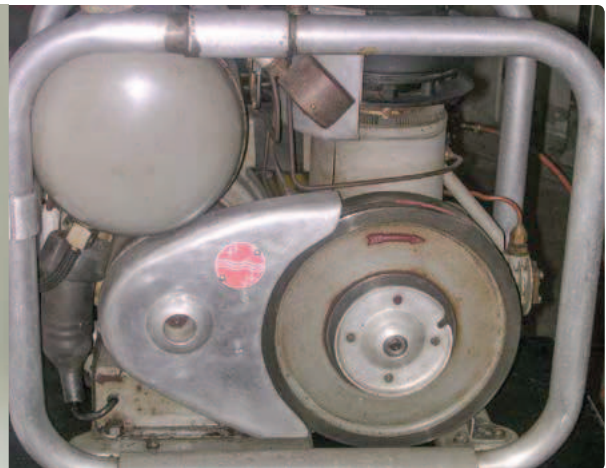
Vorführen des Stirlingmotors mit Kühlung.

Die Funktionsfähigkeit und der Wirkungsgrad eines Stirlingmotors basieren auf dem Temperaturunterschied. Üblicherweise liegt er zwischen 10 und 30 Prozent. Wird aber die thermische Energie (Abwärme) mitgenutzt, so können Wirkungsgrade von bis zu 90 Prozent erreicht werden. Wenn sowohl thermische Energie und elektrische Energie genutzt werden, nennt man das Kraft-Wärme-Kopplung.

**Viel Spaß und Erfolg bei der Durchführung!**



Ein funktionierendes Modell eines Stirlingmotors  
(Foto: Claudio Minonzio (Eigenes Werk), via Wikimedia Commons, CC BY-SA 3.0 <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/>)



Philips-Stirlingmotor mit 180 W, Baujahr 1953  
(Foto: Norbert Schnitzler (Eigenes Werk), via Wikimedia Commons, CC-BY-SA-3.0 <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/>)

# Ist es für einen Landwirt sinnvoll eine Biogasanlage zu bauen?

Vier Kühe machen pro Tag etwa 60 kg Mist, daraus können ca. 6 Kubikmeter Biogas hergestellt werden. Die Biomasse, welche diese Kühe in einem Jahr erzeugen, entspricht der Energie von mehr als 1000 Liter Heizöl.



## Befragung eines Landwirts

„Herr Becker, haben Sie vor auf Ihrem Hof eine Biogasanlage einzurichten?“

„Ich habe das mal durchkalkuliert. Mein Betrieb hat eine Fläche von ca. 180 Hektar. Das ist aber zu klein für eine Biogasanlage, denn man muss ja berücksichtigen, dass die technische Anlage, die man braucht, um Biogas zu erzeugen, Geld kostet. Man muss ja die entsprechenden Anlagenteile zunächst mal bauen, dann die Technik usw. z. B. die Steuerungsanlagen und die Entschwefelung. Diese Anschaffungskosten, die man auf alle Fälle hat, lohnen sich aber erst ab einer bestimmten Größe. Meine Meinung ist, dass sich so eine Investition nach 10 bis 11 Jahren amortisiert haben sollte. Dann muss man schwarze Zahlen schreiben, sonst hat das keinen Wert. Nach meiner Rechnung wäre das ab einer Fläche von 500 Hektar der Fall. Ich



habe das mit einigen Kollegen mal angedacht, aber dann ist daraus nichts geworden, weil wir uns nicht einigen konnten, wie wir die Investitionen, Arbeiten und Betriebskosten gerecht aufteilen können. Außerdem wollten einige der Kollegen ihren jetzt laufenden Betrieb nur teilweise auf Biogasproduktion umstellen. Dann haben auch die Forstleute und Jäger Bedenken gehabt. Eine Biogasanlage braucht eben bestimmte Mengen von bestimmten Pflanzen, damit sie gut läuft. Das bedeutet, dass man bei uns zum Beispiel ziemlich viel Grünmais anbauen müsste, was wieder gut für die Wildschweine wäre. Deren Bestand bekommen dann die Jäger nur schwer in den Griff, weil sich die Wildschweine gern in den Maisfeldern aufhalten und kaum zu bejagen sind. Letztlich habe ich mich dann entschlossen lieber eine Fotovoltaik-Anlage auf meinem Kuhstall zu bauen.“

Quelle: Chemieportal des Landesbildungsservers Baden-Württemberg: [http://www.schule-bw.de/unterricht/faecher/chemie/projekte/methan, Maisenbacher \[22.01.2016\]](http://www.schule-bw.de/unterricht/faecher/chemie/projekte/methan, Maisenbacher [22.01.2016])

# Entstehung von Biogas

Biogas entsteht durch den Abbau von organischem Material mithilfe von Kleinstlebewesen, wie Hefepilzen oder Bakterien. Der Vorgang läuft unter Ausschluss von Sauerstoff ab, deshalb wird dieser „anaerobe Gärung“ genannt. Die oben genannten Lebewesen brauchen Nährstoffe, die auch für uns Menschen die Hauptnährstoffe darstellen:

**Kohlenhydrate:** Zucker, Stärke und Cellulose. Kommen z. B. vor in Obst und Gemüse, Brot, Nudeln, Getreide, Gras, Mais, Hülsenfrüchten, verschiedenen Fleischsorten, Fisch, Nüssen und auch Milch und Milchprodukten.

**Eiweiße (werden auch Proteine genannt):** Kommen z. B. vor in Fleisch, Fisch, Milch und Milchprodukten sowie Eiern, Hülsenfrüchten, Kartoffeln, Mais, Reis, Getreide, Brot und Teigwaren.

**Fette:** Kommen z. B. vor in Milch und pflanzlichen Ölen.

## Information

**Es gibt auch natürliche Orte der Methanbildung:**

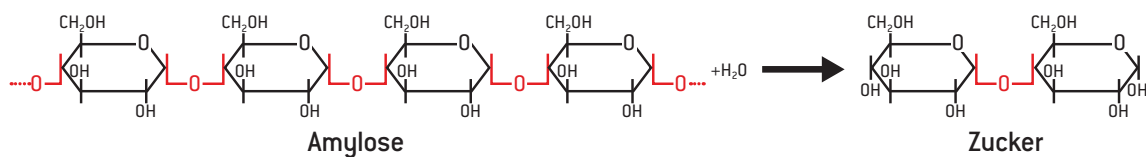
- Sümpfe, Teiche, Seen
- Kläranlagen
- Pansen von Wiederkäuern. Der Pansen ist einer der drei Vormägen von Wiederkäuern.
- Blinddarm von Pferden
- Nassreisbau

**Überall dort müssen Bakterien vorhanden sein, die die Methanbildung möglich machen!**

# Vereinfachte Vorgänge der Biogasherstellung

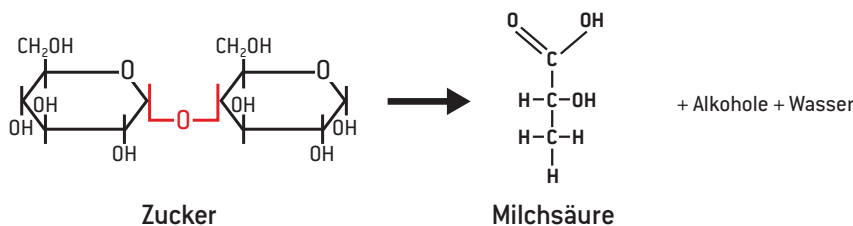
Die anaerobe Gärung läuft im Wesentlichen in vier Schritten ab:\*

**1. Hydrolyse:** Die langkettigen Moleküle [Kohlenhydrate, Fette und Proteine] werden durch Anlagerung von Wassermolekülen gespalten.



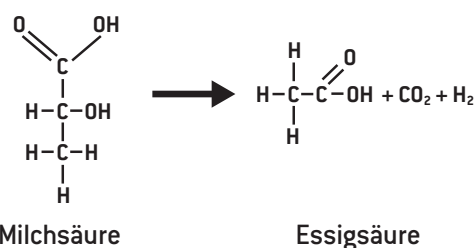
Beispiel: Amylose (Bestandteil der natürlichen Stärke in Kartoffeln) wird in Zucker gespalten.

**2. Säurebildung:** Acidogene Bakterien wandeln die Spaltprodukte in Säuren um.



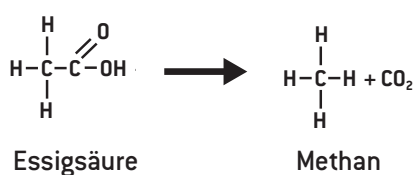
Beispiel: Zucker wird in Milchsäure umgewandelt.

**3. Essigsäurebildung:** Acetogene Bakterien wandeln die Säure in Essigsäure, Kohlenstoffdioxid und Wasserstoff um.



Beispiel: Die entstandene Milchsäure wird in Essigsäure, Kohlenstoffdioxid und Wasserstoff umgewandelt.

**4. Methanbildung:** Methanogene Bakterien wandeln die Essigsäure letztendlich in den gasförmigen Stoff Methan und Kohlenstoffdioxid um. Methan ist der Hauptbestandteil von Biogas.



\* Reaktionsgleichungen didaktisch vereinfacht



# Arbeitsauftrag: Herstellung von Biogas

Ihr habt nun die einzelnen Entstehungsschritte von Biogas kennengelernt. In dieser Experimentalphase geht es darum, dass ihr wissenschaftlich arbeitet und dabei Möglichkeiten zur Synthese von Biogas ausprobiert.

Überlegt euch in Teams von drei bis vier Personen, was eine sinnvolle Zusammenstellung von höchstens vier der ausgelegten Stoffe wäre, um Methan herzustellen.

Überlegt euch auch, wie viel ihr in etwa von jedem Stoff einsetzen wollt. Es soll der gesamte Erlenmeyerkolben mit der Substratmischung befüllt und eine maximale Menge an Methan erhalten werden.

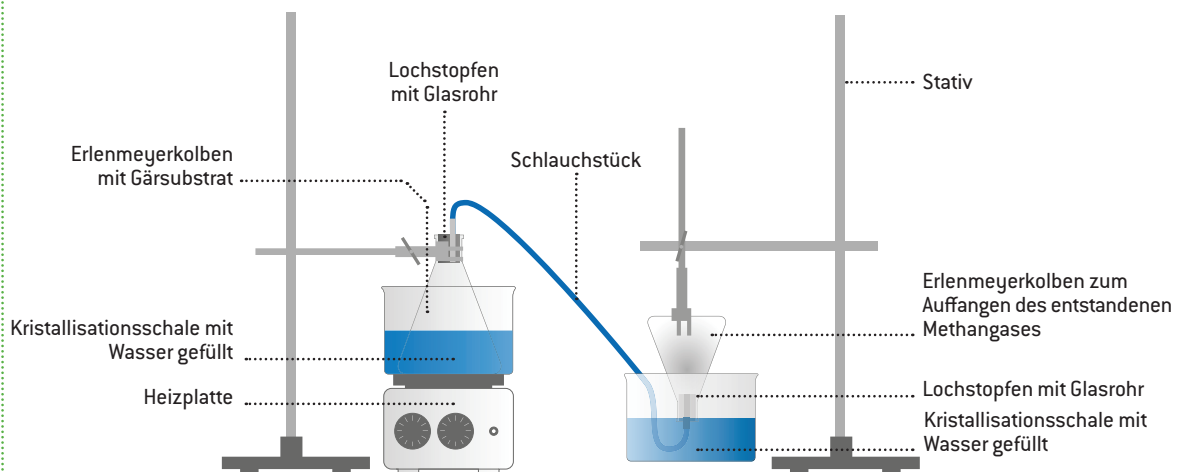
Einige Überlegungen, die ihr bedenken solltet:

1. Welche Stoffe sind nötig, damit die Biogassynthese ablaufen kann?
2. In welchen der ausgelegten Stoffe sind Bakterien enthalten, die die Biogassynthese erst möglich machen?
3. Wie bekommt ihr es hin, dass der Behälter, in dem die Gärung abläuft, keine Luft enthält?

Wenn ihr euch die Stoffe für die Substratmischung ausgesucht habt, sprecht ihr dieses mit eurer Lehrkraft durch. Anschließend könnt ihr mit dem Versuchsaufbau beginnen und eure Substratmischung ansetzen. Wiegt alle eingesetzten Materialien vorher ab und notiert die Werte. Diese werden später benötigt.

Die angesetzte Substratmischung wird kräftig umgerührt und dann im Wasserbad (30–40 °C) 15 Minuten lang erhitzt. Der Gärbehälter wird aus dem Wasserbad genommen und in Alufolie eingepackt, damit die Gärmischung nicht so schnell abkühlt. Der Gärprozess braucht jetzt mehrere Tage.

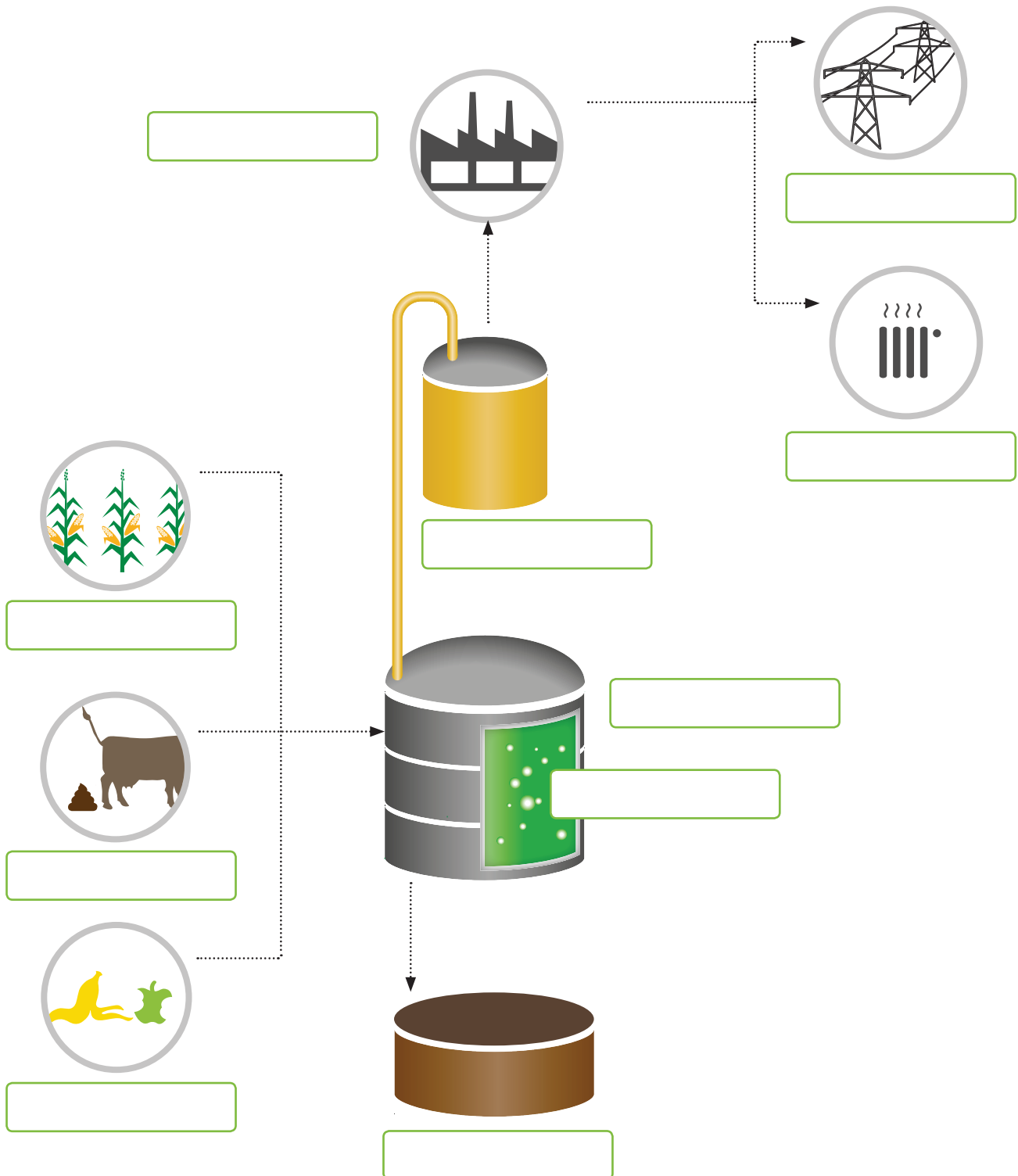
Versuchsaufbau zur Biogasherstellung:



# Biogasanlage

Beschrifte bitte die einzelnen Bestandteile der Biogasanlage mit folgenden Begriffen:

- Energiepflanzen
- Biogasspeicher
- Wärme
- Fermenter
- Bioabfall
- Strom
- Gärrestlager
- Biogas
- Gülle/Mist
- Wärmetauscher



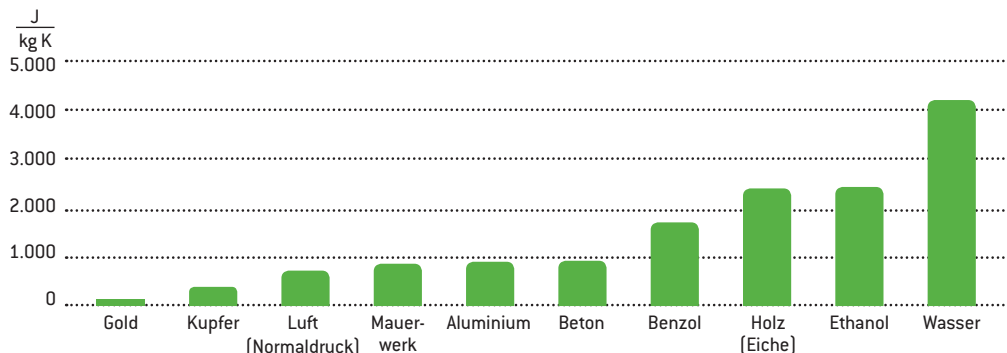
## Energiedichte

Mit der Energiedichte gibt man den Energiegehalt pro Volumen ( $\text{kJ}/\text{cm}^3$ ) eines Stoffes an.

## Die spezifische Wärmekapazität

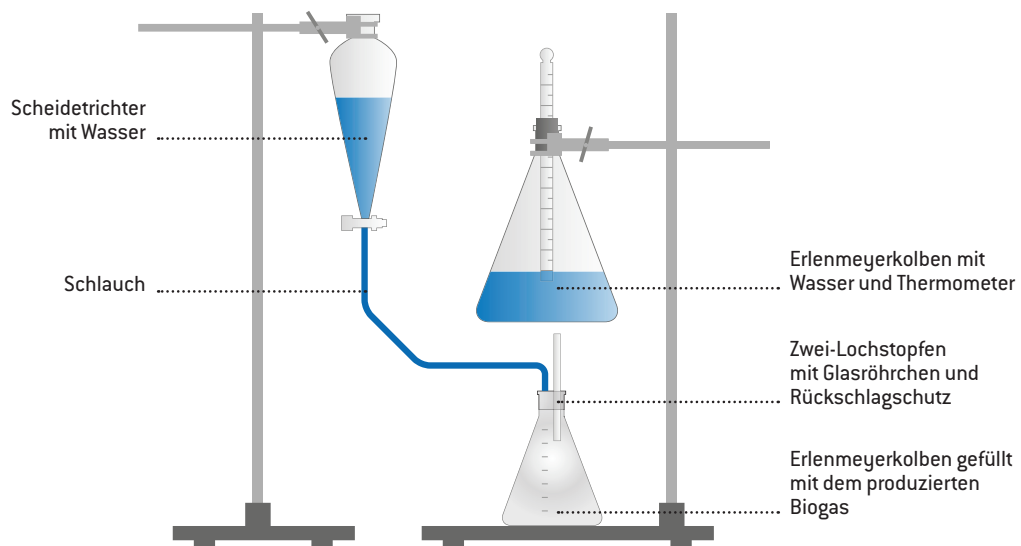
Sie gibt die Energiemenge an, die benötigt wird, um 1 kg eines Stoffes um  $1^\circ\text{C}$  (bzw. 1 K) zu erwärmen.

Beispiele für spezifische Wärmekapazitäten:



Werte entnommen aus: Erbrecht, R. u. a. (Hrsg.), Das große Tafelwerk interaktiv. Cornelsen Verlag, Berlin 2006. S. 101 ff.

Versuchsaufbau zur Ermittlung der Energiedichte:



Gruppe	Zusammensetzung Gärsubstrat	Energiedichte
1		
2		
3		
4		
5		

**Durchschnittliche Zusammensetzung von Biogas:**

Bestandteil	Konzentration (Volumenprozent)
Methan (CH <sub>4</sub> )	50 bis 75
Kohlenstoffdioxid (CO <sub>2</sub> )	25 bis 45
Wasser (H <sub>2</sub> O)	2 (20°) bis 7 (40°)
Schwefelwasserstoff (H <sub>2</sub> S)	20 bis 20.000 ppm (2 Vol.-%)
Stickstoff (N <sub>2</sub> )	< 2
Sauerstoff (O <sub>2</sub> )	< 2
Wasserstoff (H <sub>2</sub> )	< 1

Quelle: Kaltschmitt, M. und Hartmann, H. (2001), Energie aus Biomasse: Grundlagen, Techniken und Verfahren. Berlin u. a.: Springer, S. 676.

**Die Zusammensetzung des Biogases variiert je nach Gärsubstrat und Reaktionsbedingungen:**

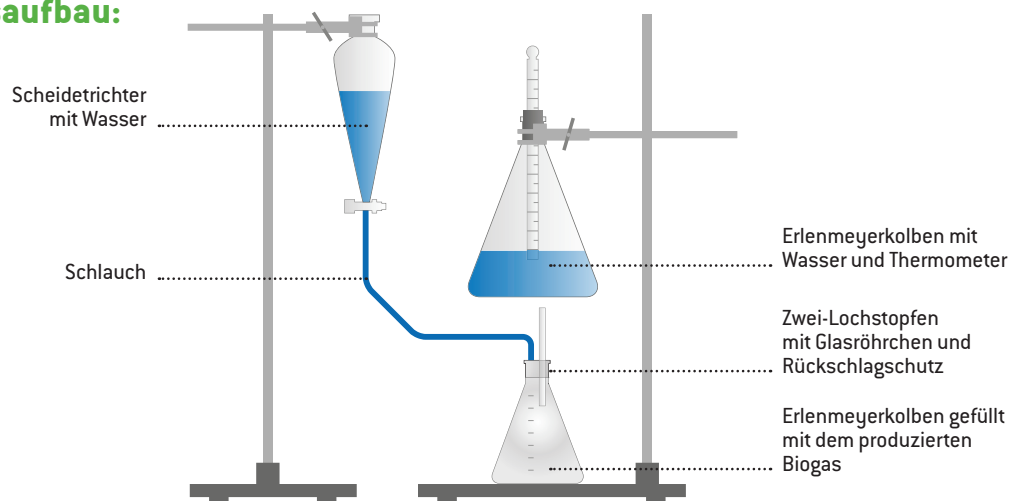
Gärsubstrat	Methananteil
Milchviehgülle	55 %
Vollmilch	62,8 %
Kartoffeln roh	51,4 %
Zwiebelschalen	65 %
Altbrot	52,8 %
Karotten	52 %

Quelle: Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, Institut für Agrarökonomie

- ➔ Die Energiedichte hängt direkt vom Methangehalt ab.
- ➔ Reines Methan hat eine Energiedichte von 33.480 kJ/cm<sup>3</sup>
- ❓ Wie viel Methan ist demzufolge in eurem Gärsubstrat enthalten?

# Versuch zur Ermittlung der Energiedichte

## Versuchsaufbau:



## Versuchsdurchführung:

Baut den Versuch wie oben gezeigt auf, lasst den Kolben mit dem Gas aber noch im Wasserbad liegen. In den oberen Erlenmeyerkolben füllt ihr 100 ml Wasser mit Raumtemperatur. In den Scheidetrichter füllt ihr eine abgemessene Menge an Wasser, die in etwa der Gasmenge in eurem unteren Erlenmeyerkolben entspricht. Notiert euch die eingesetzte Menge an Wasser.

**Wichtig: Bei den folgenden Schritten darf das Methangas nicht entweichen.** Methan hat eine geringere Dichte als Luft, deshalb darf der Gaskolben nicht an der Luft geöffnet werden!

Nehmt nun den Gaskolben aus dem Wasserbad und verschließt ihn im mit Wasser gefüllten Waschbecken mit dem Stopfen mit zwei Löchern, an dem bereits die beiden Glasröhrchen befestigt sind. Das eine Glasrohr ist mit Eisenwolle als Rückschlagschutz versehen. Jetzt muss der Hahn des Scheidetrichters langsam geöffnet werden, sodass kontinuierlich Wasser in den Gaskolben fließt. Im selben Moment wird das Gas an dem Glasröhrchen **vorsichtig (Schutzbrille! 🧐)** entzündet. Ist alles Gas verbraucht, so schließt ihr den Hahn des Scheidetrichters, sodass kein Wasser mehr in den Erlenmeyerkolben fließen kann.

Nach einer Weile, wenn das Gas schon verbrannt ist, steigt die Temperatur des Wassers nicht weiter. Diese Temperatur notiert ihr als Endtemperatur. Wenn sich die Endtemperatur eingestellt hat, entfernt ihr den Schlauch von dem Erlenmeyerkolben und gebt das restliche Wasser aus dem Scheidetrichter in einen Messzylinder. Durch Verrechnen des ursprünglich eingesetzten Volumens an Wasser mit dem übrigen Wasservolumen könnt ihr dann das Volumen an verbranntem Gas berechnen.

Anfangstemperatur

Endtemperatur

Temperaturdifferenz

Mithilfe der spezifischen Wärmekapazität von Wasser ( $c_w = 4,2 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$ ) kann die durch die Verbrennung des Gases abgegebene Energiemenge bestimmt werden.

# Berechnung der Energiedichte

## 1. Berechnung der Wärmemenge:

$$Q = c_w \cdot \Delta T \cdot m_w$$

Q	Wärmemenge
$c_w$	spezifische Wärmekapazität von Wasser
$\Delta T$	Temperaturdifferenz
$m_w$	Masse Wasser

## 2. Berechnung der Energiedichte:

$$w = \frac{Q}{V_{\text{Gas}}}$$

w	Energiedichte
Q	Wärmemenge
$V_{\text{Gas}}$	Volumen Gas

## Hinweise:

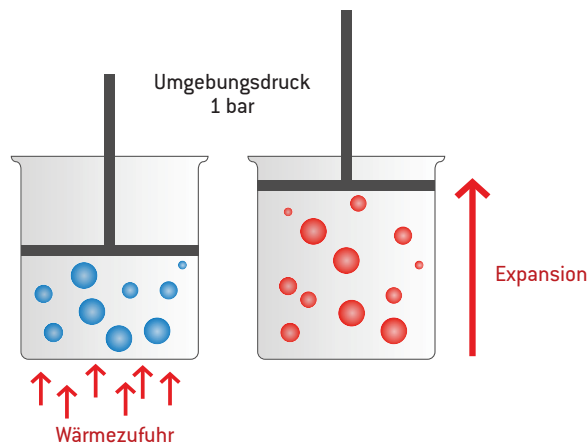
- $1 \text{ ml} \triangleq 1 \text{ cm}^3$
- $1000 \text{ cm}^3 \triangleq 1 \text{ dm}^3$
- $1 \text{ l} \triangleq 1 \text{ dm}^3$
- Die Dichte von Wasser ist  $1 \text{ g/cm}^3$  bzw.  $1 \text{ kg/dm}^3$ .
- Die vom Gas abgegebene Energie errechnet sich über die Formel:  $Q = c_w \cdot \Delta T \cdot m_w$
- $c_w$ : spezifische Wärmekapazität von Wasser
- $\Delta T$ : Temperaturdifferenz (in Kelvin)
- $m_w$ : Masse des Wassers (in kg)

# Verhalten von Gasen bei Temperaturänderung

## Volumenausdehnung von Gasen

Erhöht man die Temperatur von einem Gas bei gleichbleibendem Druck (Umgebungsdruck), dehnt sich das Gas aus. → Volumenzunahme

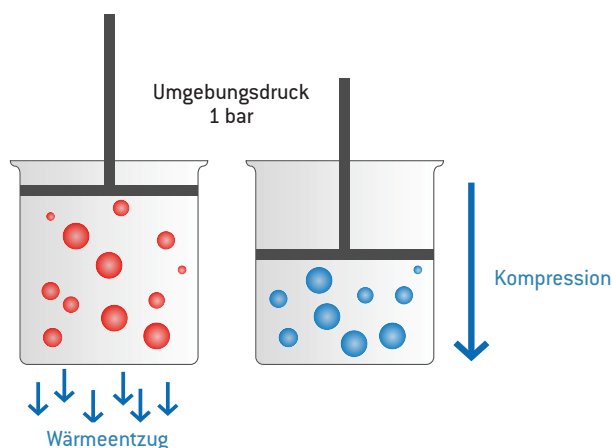
Diesen Vorgang nennt man **Expansion**.



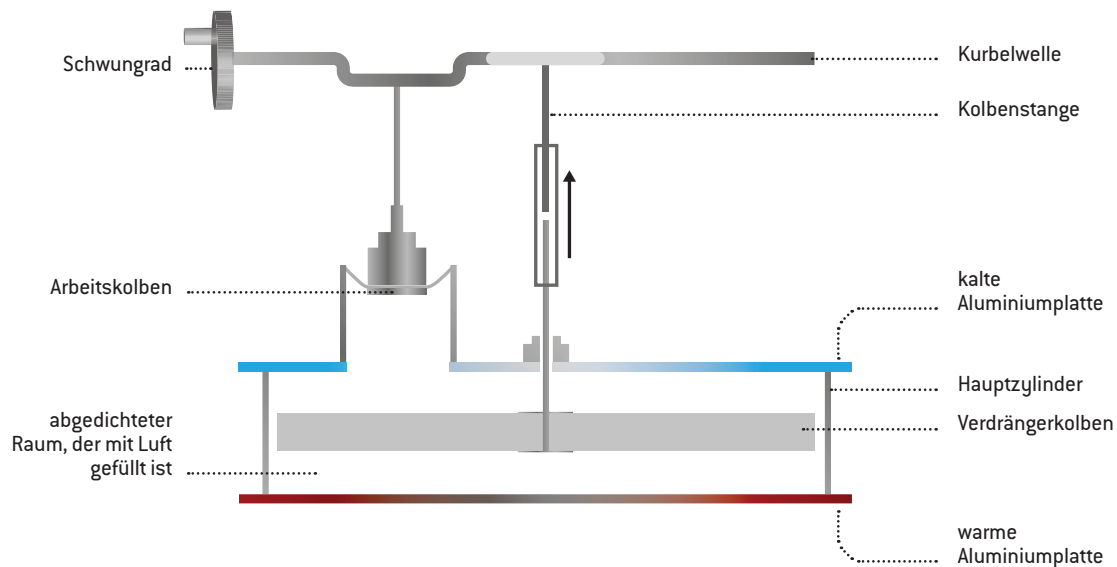
## Volumenverringering von Gasen

Verringert man die Temperatur eines Gases bei gleichbleibendem Druck (Umgebungsdruck), zieht sich das Gas zusammen. → Volumenabnahme

Diesen Vorgang nennt man **Kompression**.



# Aufbau und Funktionsweise des Stirlingmotors

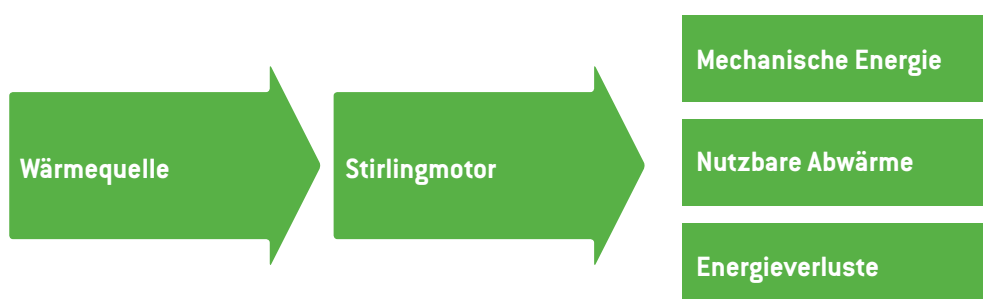


Der Verdrängerkolben besteht aus einer Schaumstoffscheibe, welche mit einer Kolbenstange verbunden ist. Mit dieser Kolbenstange kann der Verdrängerkolben innerhalb des Hauptzylinders auf und ab bewegt werden. Durch diese Auf-und-Ab-Bewegung wird die Luft abwechselnd hin zu der warmen oder zu der kalten Aluminiumplatte gedrückt. Die Luft wird also abwechselnd erwärmt und abgekühlt. Dadurch dehnt sich die Luft abwechselnd aus (an warmer Aluminiumplatte) und zieht sich wieder zusammen (an kalter Aluminiumplatte).

Da der Hauptzylinder mit dem **Arbeitskolben** verbunden ist und dieser aus elastischem Material besteht, wird dieser abwechselnd weggeschoben und angesaugt. Es entsteht eine periodische Bewegung des Arbeitskolbens, wodurch die **Kurbelwelle** gedreht wird. Mit dieser wiederum ist ein großes Schwungrad verbunden.

Durch die Kurbelwelle sind der Verdrängerkolben und der Arbeitskolben um eine Vierteldrehung zueinander versetzt, wodurch eine kontinuierliche rotierende Bewegung physikalisch erst möglich wird.

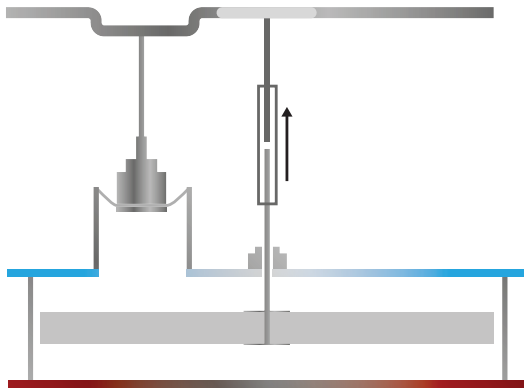
! Wärmeenergie wird in Bewegungsenergie umgewandelt.



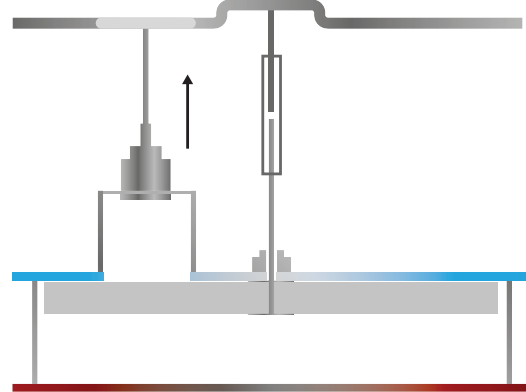


# Funktionsweise des Stirlingmotors

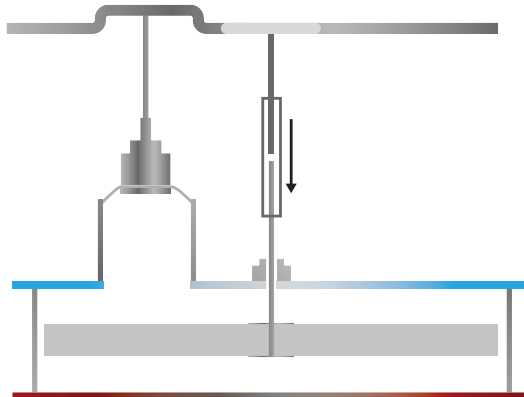
Phase 1



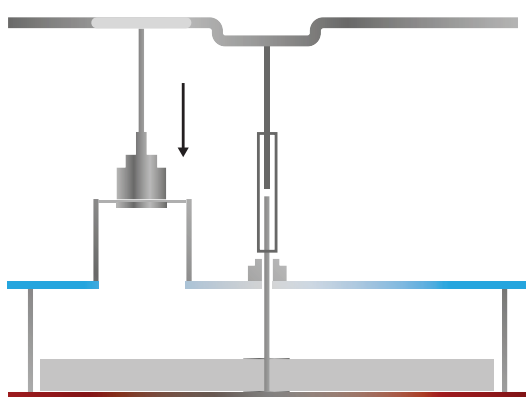
Phase 2



Phase 3



Phase 4



# Funktionsweise des Stirlingmotors

[vereinfacht]

## Phase 1

### Beschreibung des Zustands:

Der Verdrängerkolben befindet sich in der Mitte des Hauptzylinders. Dabei hat die Luft oberhalb des Verdrängerkolbens eine niedrigere Temperatur als die Luft unterhalb des Verdrängerkolbens.

Der Arbeitskolben befindet sich im unteren Umkehrpunkt seiner Bewegung.

### Folgende Veränderung des Zustands:

Der Verdrängerkolben bewegt sich nach oben. → Die Luft niedrigerer Temperatur strömt zu der erwärmten Metallplatte und dabei kommt es durch die Erwärmung zur Expansion.

## Phase 2

### Beschreibung des Zustands:

Der Verdrängerkolben befindet sich im oberen Umkehrpunkt seiner Bewegung. Die Luft befindet sich unterhalb des Verdrängerkolbens an der erwärmten Metallplatte des Hauptzylinders.

Der Arbeitskolben bewegt sich mit maximaler Geschwindigkeit nach oben.

### Folgende Veränderung des Zustands:

Aufgrund der Expansion erhöht sich der Druck der eingeschlossenen Luft und der Arbeitskolben bewegt sich nach oben.

## Phase 3

### Beschreibung des Zustands:

Der Verdrängerkolben befindet sich in der Mitte des Hauptzylinders. Dabei hat die Luft oberhalb des Verdrängerkolbens eine niedrigere Temperatur als die Luft unterhalb des Verdrängerkolbens.

Der Arbeitskolben befindet sich im oberen Umkehrpunkt seiner Bewegung.

### Folgende Veränderung des Zustands:

Der Verdrängerkolben bewegt sich nach unten. → Die Luft höherer Temperatur strömt zu der nicht erwärmten Metallplatte und dabei kommt es durch die Abkühlung zur Kompression.

## Phase 4

### Beschreibung des Zustands:

Der Verdrängerkolben befindet sich im unteren Umkehrpunkt seiner Bewegung. Dabei befindet sich die Luft oberhalb des Verdrängerkolbens an der nicht erwärmten Metallplatte des Hauptzylinders.

Der Arbeitskolben bewegt sich mit maximaler Geschwindigkeit nach unten.

### Folgende Veränderung des Zustands:

Aufgrund der Kompression vermindert sich der Druck der eingeschlossenen Luft und der Arbeitskolben bewegt sich nach unten.