

Wärmekraftmaschinen

Mirja Hüßler, WS 21/22

Inhalt

1	Grundlagen zur Wärmekraftmaschine	1
1.1	Expansion von Gasen	2
1.2	Wirkungsgrad	2
2	Volumenarbeit	3
2.1	Experiment zur Veranschaulichung von Volumenarbeit	3
3	Die Dampflokomotive	4
3.1	Berechnung des Wirkungsgrads	5
3.2	Nachteile einer Dampflokomotive	5

Einstieg: Weihnachten steht kurz vor der Tür und genauso wie die Zauberschüler*innen von Hogwarts fahre auch ich über die Weihnachtszeit zu meiner Familie. Allerdings wird meine Zugfahrt leider um einiges weniger spektakulär als die Fahrt der angehenden Zauberer und Hexen mit dem Hogwarts-Express. Die romantischen Dampflokomotiven, die zu Beginn des 20. Jahrhunderts noch die Einzigen auf den Schienen waren, sind heute fast vollständig von eher nüchternen Diesel- und vor allem Elektroloks verdrängt. Mit Dampfmaschinen angetriebene Loks findet man eigentlich bloß noch in Museen oder auf Zugstrecken mit ganz besonderem Flair. Der Vortrag soll untersuchen, ob die „Ausmusterung“ auch aus Nachhaltigkeitsgründen berechtigt ist.

1 Grundlagen zur Wärmekraftmaschine

Weihnachtspyramiden, wie die in Abb. 1, sind eine sehr einfache Form von Wärmekraftmaschinen. Sobald die Kerzen angezündet sind, setzen sich die Flügel in Bewegung und die Weihnachtspyramide dreht sich. Es wird also ein Teil der von den Kerzen ausgehenden Wärme für die Bewegung der Flügel genutzt. Man spricht hierbei davon, dass Arbeit verrichtet wird. [1]



Abb. 1: Eine Weihnachtspyramide.

Wärmekraftmaschinen wandeln Wärme in Arbeit um. Das Prinzip, das dahintersteckt, ist in Abb. 2 veranschaulicht.

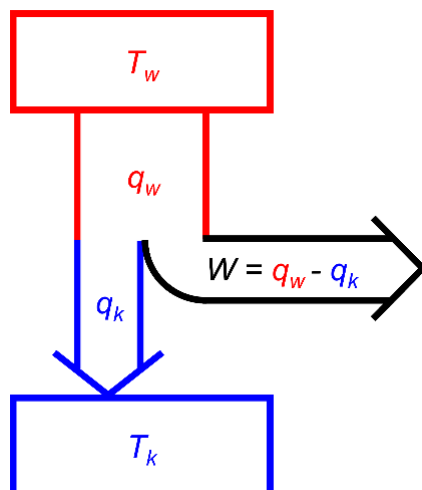


Abb. 2: Das Prinzip einer Wärmekraftmaschine.

Das heiße Reservoir mit einer Temperatur T_w führt der Maschine eine Wärmemenge q_w zu. Ein Teil der zugeführten Wärme wird in Arbeit W umgewandelt. Der Rest der zugeführten Wärme wird zum kalten Reservoir mit einer Temperatur T_k abgeführt. Die abgeführte Wärmemenge wird mit q_k bezeichnet. Folglich entspricht der Betrag der geleisteten Arbeit der Differenz aus den Beträgen der zugeführten und abgeführten Wärmemenge [2]:

$$|W| = |q_w| - |q_k| \quad (1)$$

Im Fall der Weihnachtspyramide entspricht die Luft über den Kerzen dem heißen Reservoir und die Umgebungsluft dem kalten Reservoir.

1.1 Expansion von Gasen

Bei der Erwärmung von Gasen nimmt die kinetische Energie der Gasmoleküle zu. Sie bewegen sich dadurch schneller und brauchen dafür mehr Platz. Es passen nicht mehr so viele Moleküle auf den gleichen Raum wie vor der Erwärmung und das Gas dehnt sich aus. Durch die Expansion nimmt die Dichte, also die Masse an Gas pro Volumen, ab.

Bei der Weihnachtspyramide wird die Luft über der Kerze erwärmt und es kommt zur Expansion des Gases. Dadurch ist die erwärmte Luft leichter als die sie umgebende, kalte Luft und steigt auf. Wenn die energiereichen Luftmoleküle auf die schräg gestellten Flügel der Weihnachtspyramide treffen, versetzen sie diese durch Abgabe eines Teils ihrer Energie in Bewegung und die Pyramide dreht sich. [1]

1.2 Wirkungsgrad

Über das Verhältnis der geleisteten Arbeit W zur zugeführten Wärme q_w kann die Effizienz von Wärmekraftmaschinen abgeschätzt werden [2]:

$$\eta = \frac{|W|}{|q_w|} \quad (2)$$

Über Einsetzen von Formel (1) für den Betrag der geleisteten Arbeit ergibt sich die folgende Formel:

$$\eta = \frac{|q_w| - |q_k|}{|q_w|} = 1 - \frac{|q_k|}{|q_w|} \quad (3)$$

Für eine Wärmekraftmaschine mit idealem Gas als Arbeitsmittel entspricht der Quotient aus zugeführter und abgeführter Wärmemenge dem Quotienten aus der Temperatur des kalten Reservoirs und der des heißen Reservoirs [3]:

$$\eta = 1 - \frac{|T_k|}{|T_w|} \quad (4)$$

Da die Temperaturen der Reservoirs in der Regel einfacher messbar sind als die zu- und abgeführten Wärmemengen, wird diese Formel (4) für den thermischen Wirkungsgrad oft als Annäherung genutzt.

Bei der Weihnachtspyramide sind die Temperaturunterschiede zwischen der Luft über der Kerze und der Umgebungsluft nur sehr gering, sodass ihr Wirkungsgrad entsprechend niedrig ist.

2 Volumenarbeit

Ein expandierendes Gas, das einen Kolben um eine Höhe h gegen einen äußeren Druck p verschiebt, leistet Volumenarbeit (Abb. 3). [4]

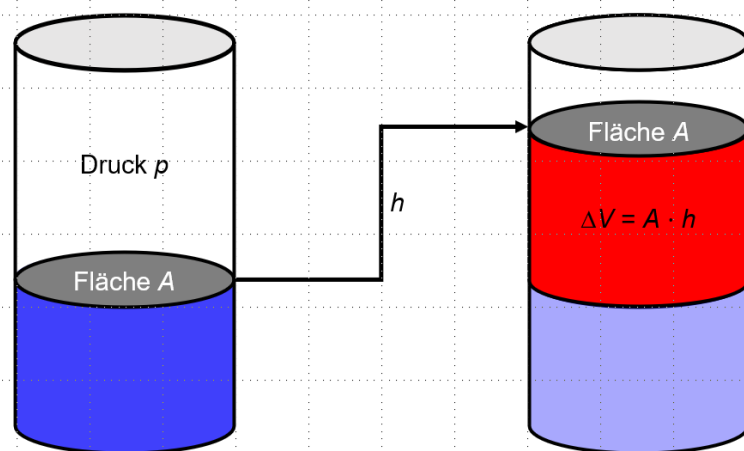


Abb. 3: Durch die Volumenarbeit des Gases wird der Kolben mit der Fläche A gegen den äußeren Druck p um die Höhe h angehoben.

- **Volumenarbeit $W = \text{Kraft} \cdot \text{Weg}$**
 - Kraft = äußerer Druck $p \cdot$ Fläche A
 - Weg = Höhe h
 - Volumenänderung: $\Delta V = A \cdot h$

Beim Verrichten von Arbeit wird Energie abgegeben, sodass die Volumenarbeit ein negatives Vorzeichen haben muss [4]:

$$W = -p \cdot A \cdot h = -p \cdot \Delta V \quad (5)$$

2.1 Experiment zur Veranschaulichung von Volumenarbeit

Mithilfe eines einfachen Experiments lässt sich veranschaulichen, wie expandierende Gase Volumenarbeit leisten.

Durchführung: Etwas Wasser wird in einem Erlenmeyerkolben auf einer Heizplatte erhitzt. Sobald das Wasser zu Kochen beginnt, wird ein Gummistopfen, der über einen Schlauch mit einer Spritze verbunden ist, auf den Erlenmeyerkolben gesetzt.

Beobachtung: Kurz nach dem Aufsetzen des Stopfens verschiebt sich der Kolben der Spritze.

Deutung: Durch das Erhitzen beginnt das Wasser zu siedeln. Der dabei entstehende Wasserdampf gelangt nach Aufsetzen des Stopfens über den Schlauch in die Spritze.

Hier verschiebt das expandierende Gas den Kolben gegen den äußeren Atmosphärendruck und leistet damit Volumenarbeit.

3 Die Dampflokomotive

Anhand des Querschnitts einer Dampfmaschine (Abb. 4) lassen sich die bei der Fahrt einer Dampflok ablaufenden Prozesse nachvollziehen. [5]

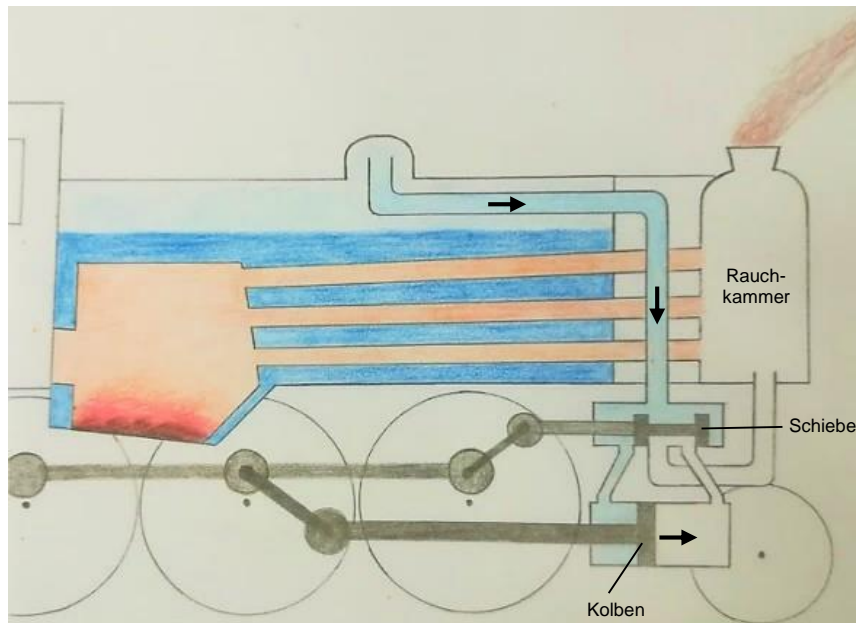


Abb. 4: Querschnitt einer Dampfmaschine mit den heißen Rauchgasen in Orange, dem Wasser in Dunkelblau und dem Wasserdampf in Hellblau.

In der Feuerbüchse wird in der Regel Kohle verbrannt. Die dabei erzeugte Wärme wird direkt an die Wände und damit an das die Feuerbüchse umlaufende Wasser abgegeben. Bei der Verbrennung des fossilen Brennstoffs entstehen heiße Rauchgase. Diese durchströmen eine Vielzahl an Heizrohren und geben dabei ebenfalls Wärme an die Rohrwandungen sowie das sie umgebende Wasser im Kessel ab.

Durch das Erhitzen des Wassers entsteht Wasserdampf. Auch wenn dieser in Realität farblos ist, ist er in Abb. 4 in Hellblau eingezeichnet, damit die Strömungsrichtung besser nachvollzogen werden kann. Genau wie die heiße Luft bei der Weihnachtspyramide steigt auch der Wasserdampf aufgrund seiner geringeren Dichte auf. Er wird so in einem Rohr gesammelt, durch das er schließlich über das offene Ventil - in Abb. 4 das Hintere - in den Dampfzylinder gelangt.

Hier wird nun die kinetische Energie der Moleküle des heißen Wasserdampfs in mechanische Energie umgewandelt. Es wird also Arbeit geleistet, indem der Kolben durch die Expansion des Gases verschoben wird.

Der Kolben steht mit den Rädern in Verbindung. Wird der Kolben nach vorne bewegt, drehen sich die Räder – allerdings erstmal nur zur Hälfte. Für eine vollständige Umdrehung muss der Kolben wieder in die andere Richtung bewegt werden. Um das zu ermöglichen, gibt es den Schieber, der ebenfalls mit dem Radsystem in Verbindung steht und dafür sorgt, dass der Kolben hin und her gedrückt wird, indem er den hinteren und den vorderen Eingang in den Dampfzylinder abwechselnd öffnet.

Durch das Verschieben des Kolbens wird zeitgleich auch der Wasserdampf, der bereits Arbeit geleistet hat, aus dem Zylinder gedrückt. Er gelangt über ein Rohr in die Rauchkammer und reißt dort die heißen Rauchgase aus der Feuerbüchse mit. Die Abgabe der unter Druck stehenden Gase aus der Rauchkammer in die Atmosphäre ist verantwortlich für das typische Auspuffgeräusch von Dampflocs.

3.1 Berechnung des Wirkungsgrads

Über die in Kapitel 1.2 hergeleitete Formel (4) lässt sich der thermische Wirkungsgrad einer Dampfmaschine annähern:

$$\eta = 1 - \frac{|T_k|}{|T_w|} \quad (4)$$

Für T_w wird die Temperatur eingesetzt, die der heiße Wasserdampf beim Ankommen im Zylinder hat. Durch ein Überhitzen des Wasserdampfs auf dem Weg zum Zylinder kann die Temperatur des heißen Reservoirs auf bis zu 370 °C maximiert werden. Das entspricht circa 644 K.

Beim Leisten der Volumenarbeit geben die energiereichen Wasserdampfmoleküle einen Teil ihrer kinetischen Energie ab. Der überhitze Wasserdampf kühlt dadurch ab. Allerdings ist der Abdampf noch immer gasförmig und damit auf jeden Fall noch heißer als 100 °C.

Unter der Annahme einer sehr starken Abkühlung von 200 °C läge die Temperatur des Abdampfes bei minimal 170 °C. Für T_k wäre folglich ein Wert von 444 K einzusetzen.

$$\eta = 1 - \frac{444 \text{ K}}{644 \text{ K}} = 0,31 \quad (5)$$

Das Ergebnis bedeutet, dass bei einer Dampfmaschine 31 % der zugeführten Wärmemenge tatsächlich für Arbeit genutzt würden. Leider ist eine reale Dampfmaschine aber nicht ganz so ideal wie in der Rechnung angenommen.

3.2 Nachteile einer Dampflokomotive

Die Dampfmaschinen, die die Dampfloks antreiben, erreichen in der Realität maximal einen Wirkungsgrad von 16 %. Viele der Züge, die heute auf den Schienen unterwegs sind, werden elektrisch angetrieben. Elektromotoren zeichnen sich durch sehr hohe Wirkungsgrade von bis zu 90 % aus. Selbst wenn man den deutlich geringeren Wirkungsgrad der Stromerzeugung berücksichtigt, sind Elektroloks folglich noch immer deutlich effizienter als Dampfloks. [6]

Der geringe Wirkungsgrad der Dampfmaschine ist aber gar nicht der einzige Grund, weshalb heute kaum noch Dampfloks auf den Schienen unterwegs sind. Auch die langen Aufheizzeiten, die notwendig sind, um das Wasser zum Sieden zu bringen, sowie die Verbrennung des fossilen Brennstoffs Kohle, über die unter anderem viele umwelt- und gesundheitsschädliche Schadstoffe in die Atmosphäre emittiert werden, sprechen heutzutage gegen den Einsatz von Dampflokomotiven.

Zusammenfassung. Die Dampfmaschinen, die Dampfloks antreiben, sind Wärmekraftmaschinen. Sie wandeln Wärme in Arbeit um. Dabei wird die Expansion von heißem Wasserdampf genutzt, um einen Kolben zu verschieben, der dann die Räder in Bewegung setzt. Es wird also Volumenarbeit gegen einen äußeren Druck geleistet.

Das Verhältnis der verrichteten Arbeit zur zugeführten Wärmemenge entspricht dem Wirkungsgrad. Dieser liegt bei Dampfmaschinen deutlich niedriger als bei den Diesel- und Elektromotoren, mit denen die heute fahrenden Züge angetrieben werden.

Abschluss: *Mein Wunsch, an Weihnachten genauso wie die Hogwarts-Schüler*innen in einer Dampflokomotive heimzufahren, ist leider Nostalgie und Unwissenheit geschuldet. Sowohl der Umwelt als auch uns Menschen zuliebe sollten wir eher dankbar dafür sein, wie ruhig, schnell, nachhaltig und umweltschonend lange Zugfahrten heutzutage möglich sind.*

Quellen:

1. Schlichting J.; Ucke C.: Thermodynamische Entzauberung: Spielwiese. Physik in unserer Zeit, Heft 6, 2002, 284-286.
2. Engel T.; Reid P.: Physikalische Chemie, Auflage 1, Pearson Studium, München, 2006.
3. Bartelmann M. et al.: Theoretische Physik 4. Thermodynamik und statistische Physik, Auflage 1, Springer Spektrum, Berlin und Heidelberg, 2018.
4. Atkins, P.; de Paula, J.: Kurzlehrbuch Physikalische Chemie, Auflage 4, Wiley-VCH, Weinheim, 2008.
5. Bartelsheim U. et al.: Die Eisenbahn, Tessloff Verlag, Nürnberg, 1975.
6. <https://www.dampfmaschinen.net/wirkungsgrad-einer-dampfmaschine/>, 23.02.2023.