

Verbrennungsmotoren und Carnotscher Wirkungsgrad – Ein gängiges Missverständnis

Ulrich Harten

Hochschule Mannheim, Institut für math. – naturwissenschaftliche Grundlagen,
Paul-Wittsack-Straße 10, 68163 Mannheim,
u.harten@hs-mannheim.de

Kurzfassung

Der Wirkungsgrad von Wärmekraftmaschinen kann nicht höher sein als der Carnot'sche Wirkungsgrad. So oder so ähnlich ist es in allen Physikbüchern zu lesen. Dabei werden fast immer Verbrennungsmotoren implizit oder auch explizit zu solchen Wärmekraftmaschinen dazugezählt. Tatsächlich ist der Carnot'sche Wirkungsgrad für Verbrennungsmotoren (bei denen die Wärme durch Verbrennung im Zyklus entsteht) vollkommen irrelevant. Dies liegt daran, dass die Entropiebilanz durch Materieströme in und aus der Maschine dominiert wird und meistens auch ohne Abwärme schon positiv ist. Im Gedankenexperiment wird ein Verbrennungsmotor mit idealem Wirkungsgrad eins vorgestellt. Im Unterricht ist also zu unterscheiden zwischen echten Wärmekraftmaschinen, die mit der Umgebung nur Wärme und Arbeit austauschen (z.B. Dampfturbine, Stirling-Motor) und Verbrennungsmotoren. Der Wirkungsgrad realer Verbrennungsmotoren ist durch den konkreten Prozess begrenzt, nicht durch den zweiten Hauptsatz.

1. Wärmekraftmaschine

Eine (echte) Wärmekraftmaschine tauscht mit der Umgebung nur Wärme und Arbeit aus, also keine Materie. Entnimmt sie einem Wärmereservoir auf hoher Temperatur Wärme, so entnimmt sie auch Entropie. Soll sie periodisch laufen, muss sie diese Entropie wieder loswerden. Das kann sie nur, indem sie auch wieder Wärme abgibt. Gibt sie die Wärme an ein Wärmereservoir auf niedrigerer Temperatur, so genügt eine kleinere Wärmemenge als die aufgenommene (Abb. 1). Die Differenz kann in Arbeit umgewandelt werden. So ergibt sich der bekannte Carnot'sche Wirkungsgrad.

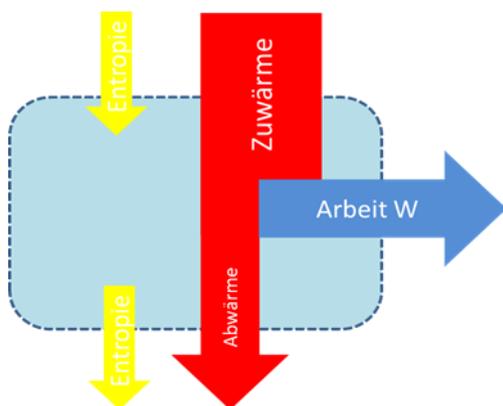


Abb. 1: Schema der Wärmekraftmaschine

2. Verbrennungsmotor

Ein Verbrennungsmotor funktioniert vollkommen anders, denn er tauscht mit der Umgebung vor allem Materie aus. Es wird gelegentlich in Lehrbüchern behauptet, man könne ihn mit einem Ersatzprozess im Sinne der eben beschriebenen Wärmekraftmaschine beschreiben [1], dies ist aber falsch. Die Thermodynamik ist eine vollkommen andere: der Prozess ist grundsätzlich hochgradig irreversibel, trotzdem ist ein idealer Wirkungsgrad eins denkbar. Abb. 2 zeigt ein Schema der Zu- und Abflüsse bei einem Verbrennungsmotor.

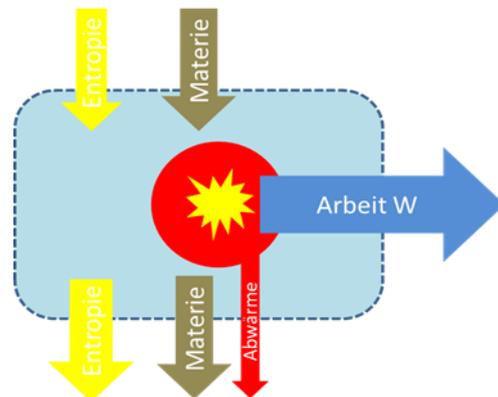


Abb. 2: Schema des Verbrennungsmotors

Der Verbrennungsmotor nimmt Materie auf. Damit nimmt er natürlich auch etwas Wärme auf, die er auf jeden Fall mit dem Abgas auch wieder abgibt. Daher ist sie im Schema vernachlässigt. Die wesentliche Wärmeproduktion findet in einer hochgradig irreversiblen chemischen Reaktion statt. Werden Kohlenwasserstoffe mit Luftsauerstoff verbrannt, ist die Entropie des Abgases bei Umgebungstemperatur in der Regel etwas höher als die Entropie der Ausgangsstoffe. Der Verbrennungsmotor wird die aufgenommene Entropie also schon mit dem Abgas wieder los und braucht für den Ausgleich der Entropiebilanz keine Abwärme abzugeben. Das reale Verbrennungsmotoren tatsächlich viel Abwärme abgeben, liegt am konkreten Prozess. Dem zweiten Hauptsatz wäre auch ohne die Abwärme genüge getan. Es sollte ein Verbrennungsmotor ohne Abwärme denkbar sein. Im Gedankenversuch soll nun ein solcher Motor beschrieben werden.

3. Verbrennungsmotor mit Wirkungsgrad eins

Wir nehmen einen normalen Otto-Motor. Wir betreiben ihn nur statt mit dem Benzin/Luft – Gemisch mit Hydrazin betreiben. Der Witz: Hydrazin ist eine hochexplosive Flüssigkeit, die den Sauerstoff für das Verbrennen schon in sich trägt. Beim Verbrennen verwandelt sich das Hydrazin vollständig in Gas, die Gasmenge im Zylinder steigt also stark an. Das ist ein wesentlicher Unterschied zum normalen Betrieb mit einem Benzin/Luft-Gemisch und ermöglicht einen ganz neuen Kreisprozess, den Abb. 3 zeigt.

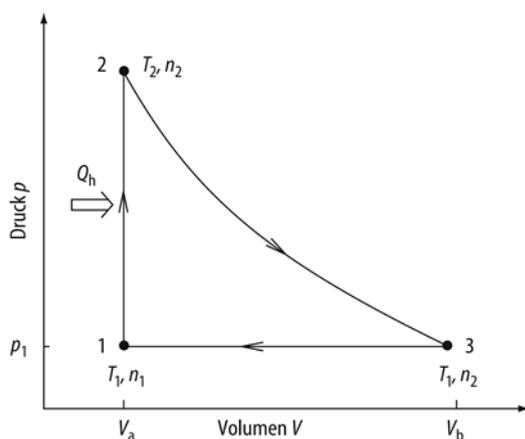


Abb. 3: Zyklus des Hydrazin-Motors

Im Punkt 1 befindet sich noch ein Teil des Abgases aus dem letzten Durchlauf im Zylinder. Außerdem wird eine bestimmte Menge Hydrazin in den Zylinder gegeben. Diese wird nun gezündet, worauf der

Druck, die Temperatur und eben auch die Gasmenge n stark ansteigt (Punkt 2). Nun wird adiabatisch expandiert, und zwar so lange, bis im Zylinder wieder der Umgebungsdruck p_1 herrscht. Man kann nun die Hydrazin-Menge so wählen, dass nach der Expansion auch die Temperatur wieder genau die Umgebungstemperatur ist. Das geht, weil im Punkt 3 die Gasmenge viel höher ist als im Punkt 1. Im Schritt von 3 nach 1 wird nun das Abgas zum Teil aus dem Zylinder ausgestoßen. Dabei ist keine Arbeit zu leisten, da das Abgas schon auf Umgebungsdruck ist. Es wird auch keine Wärme abgegeben, da das Abgas Umgebungstemperatur hat. Die gesamte beim Verbrennen des Hydrazin freigesetzte Wärme Q_h wird in Arbeit umgewandelt!

Sehr schön, nur leider möchte man aus Sicherheitsgründen doch lieber kein Hydrazin im Tank haben. Es ist nicht nur explosiv, sondern auch hochgiftig. Auch wären die Kosten trotz des tollen Wirkungsgrades zu hoch. Die Natur stellt als Oxydationsmittel für Verbrennung allgegenwärtig und kostenlos den Luftsauerstoff zur Verfügung. Deshalb arbeiten alle Verbrennungsmotoren mit ihm. Tatsächlich gibt es keinen Verbrennungsmotor in praktischer Anwendung, der auch nur annähernd den idealen Wirkungsgrad 100% hätte.

4. Fazit

Es gibt Lehrbücher, die explizit behaupten, dass auch Verbrennungsmotoren dem Carnot'schen Wirkungsgrad unterliegen [1,2]. Viel häufiger ist es allerdings so, dass der Leser diesen Eindruck gewinnt, ohne dass es explizit behauptet wird [3]. Jedenfalls solche Bücher, die den Verbrennungsmotoren ein eigenes Kapitel oder einen eigenen Abschnitt widmen, sollten den hier dargestellten Unterschied zu Wärmekraftmaschinen klar hervorheben, so wie ich es in meinem Lehrbuch tue [4].

5. Literatur

- [1] Heribert Stroppe: *Physik für Studierende der Natur- und Ingenieurwissenschaften*, 15. Auflage, Hanser Verlag 2011
- [2] Paul A. Tipler, G. Mosca: *Physik für Wissenschaftler und Ingenieure*, 6. Auflage, Springer Spektrum Verlag 2009
- [3] D. Meschede: *Gerthsen Physik*, 24. Auflage, Springer Verlag 2010
- [4] U. Harten: *Physik. Einführung für Ingenieure und Naturwissenschaftler*, 5. Auflage, Springer Verlag 2011