

Technische Hochschule
Lehrstuhl für Mechanik

K4-F4
K27b.

1. Beziehung zwischen Wärme und mechanischer Arbeit.

Der Zweck einer Dampfkesselanlage ist, Wasserdampf von höherer als atmosphärischer Spannung zu erzeugen und die hierbei erzielte Wärme durch geeignete Vorrichtungen in Arbeit umzusetzen.

Zwischen Wärme und mechanischer Arbeit besteht der Zusammenhang, daß sich jede in die andere umwandeln läßt: verschwindet mechanische Arbeit als solche, so tritt Wärme auf, verschwindet Wärme als solche, so entsteht mechanische Arbeit.

Für die Umsetzung der Wärme in Arbeit bieten die Dampfmaschinen, kalorischen und Gaskraftmaschinen den deutlichsten Beweis. Der erste, der mit Bestimmtheit aussprach, daß die mechanische Arbeit Wärme erzeugt und daß solche Erscheinungen nicht dem Freiwerden eines besonderen Wärmestoffes zuzuschreiben seien, war Graf Rumford (1752—1814). Der deutsche Arzt Dr. J. R. Mayer in Heilbronn sprach im Jahre 1842 den Satz aus, „daß Wärme und Arbeit äquivalent, d. h. gleichwertig sind.“ Damit ist zum Ausdruck gebracht, daß mit einer bestimmten Wärmemenge sich immer eine ganz bestimmte Menge mechanischer Arbeit, und umgekehrt, daß sich durch eine gegebene Menge mechanischer Arbeit stets eine ganz bestimmte Wärmemenge erzeugen läßt.

Die Zahl, welche angibt, wie viel mkg durch eine W E gewonnen werden können, nennt man das mechanische Wärmeäquivalent (d. h. den mechanischen Wärmegleichwert) der Arbeit.

Nach Dr. Mayer läßt sich das mechanische Äquivalent der Wärme auf folgende Weise aus bekannten Zahlen berechnen: Das Gewicht von 1 m³ Luft bei 0° C und 760 mm Barometerstand beträgt 1.294 kg, die spezifische Wärme der Luft bei konstantem Druck ist 0.2377; es werden demnach zur Erwärmung von 1 m³ Luft $1.294 \times 0.2377 = 0.308$ W E gebraucht. Nach dem Gay-Lussacschen Gesetz ist die Ausdehnung der Gase proportional der Wärmezunahme, und bei allen Gasen nahezu gleich groß, näm-

lich bei einer Erwärmung von 0° bis 100° C ungefähr drei Achtel des ursprünglichen Volumens. Nach Regnault beträgt die Ausdehnung für die Grenzen von 0° bis 100° C bei atmosphärischer Luft 0.3665, also dehnt sich die Luft bei der Erwärmung um 0.003665 ihres Volumens aus. Stellt man sich vor, die Luft befände sich in einer Röhre von 1 m² Querschnitt und 1 m Höhe, und diese Luftmenge würde erwärmt, so wird die Höhe der Luftsäule, die vor der Erwärmung 1 m betrug, nach der Erwärmung 1.003665 m betragen. Bei konstantem Druck beträgt die spezifische Wärme von Luft 0.237, bei konstantem Volumen aber 0.169 (bei allen Gasen ist die spezifische Wärme bei konstantem Druck ungefähr 1.4 mal so groß als die bei konstantem Volumen).

Von den berechneten 0.308 W E werden nur $1.294 \times 0.169 = 0.219$ W E zur Erwärmung der Luft verwendet, die übrigen $0.308 - 0.219$ W E $= 0.089$ W E dienen zur Ausdehnung der Luftmasse.

Bekanntlich ist der Druck der Atmosphäre auf jeden cm² Fläche gleich dem Gewichte einer Quecksilbersäule von 1 cm² Querschnitt und 760 mm Höhe. Das Volumen dieser Quecksilbersäule ist 76 cm³ und ihr Gewicht $76 \times 13.59 = 1032.8$ g, weil 1 cm³ Wasser 1 g wiegt und Quecksilber 13.59 mal so schwer ist als Wasser; daher ist der Druck der Luft auf 1 cm² Fläche $= 1.0328$ kg. Auf eine Fläche von 1 m² drückt daher die atmosphärische Luft mit einem Gewicht von 10.328 kg. Da die Höhe der Luftmasse bei der Erwärmung um 0.003665 m zunimmt, so muß dieselbe mechanische Arbeit verrichtet werden, die zur Hebung von 10.328 kg um 0.003665 m nötig ist, also $10.328 \times 0.00366 = 37.85$ mkg.

Da diese Arbeit von den 0.089 W E verrichtet wird, so entspricht einer W E die Arbeit von $37.85 : 0.089 = 425$ mkg.

Dieses mechanische Äquivalent der Wärme wurde außer von Mayer noch von dem Engländer Joule und von Hirn und mehreren anderen bestimmt. Hirn berechnete ihn aus dem Wärmeverbrauch und der Leistung einer Dampfmaschine. Als Mittelwert für das mecha-

nische Aequivalent der Wärme wurde die Zahl 424 angenommen.

Der Satz von der Gleichwertigkeit von Wärme und Arbeit (man nennt ihn den ersten Hauptsatz der mechanischen Wärmetheorie) besagt also, daß sich von einer Wärmeeinheit theoretisch stets eine Arbeit von 424 mkg, und umgekehrt durch Aufwendung einer Arbeit von 1 mkg immer eine Wärmemenge von $1/424$ W E erzeugen läßt.

Diese Wechselbeziehung zwischen Wärme und mechanischer Arbeit läßt den Schluß zu, daß in der Wärme ein gewisser Bewegungszustand der Moleküle des erwärmten Körpers herrscht. Die Wärmeerscheinungen sind ähnlich wie die Lichterscheinungen Schwingungen der einzelnen Moleküle. Wenn es auch noch nicht feststehend ist, welcher Art diese Schwingungen sind, so erkennt man jetzt doch schon, daß die ältere Ansicht, die in der Wärme einen besonderen, imponderabilen, d. h. unwägbaren Stoff, der den Körpern in größerer oder geringerer Menge innewohnt, nicht richtig ist.

Der Wärmesatz zeigt aber auch, daß es ganz falsch ist, bei Kraftmaschinen von einer Krafterzeugung zu sprechen, weil es eine Erzeugung von Kraft oder eine Erzeugung von Arbeitsvermögen gar nicht gibt. Eine Arbeit (Kraft) oder ein Arbeitsvermögen ist immer nur durch eine Umwandlung eines anderen Arbeitsvermögens entstehbar.

Auf dieser Erkenntnis beruht der Satz von der Erhaltung der Energie. Er besagt, daß ein Arbeitsvermögen (Energie) nie verloren gehen kann, sondern höchstens seine Gestalt ändern kann. Das Arbeitsvermögen kann nur scheinbar verschwinden, weil es sich entweder in kleinere Teile zerlegt oder sich in eine andere Form umgestaltet.

Eine solche Umwandlung findet mit der im Dampf enthaltenen Wärme statt, sobald er aus dem Dampfkessel in die Maschine oder Turbine kommt oder sonst in irgend einer Form zur Arbeit herangezogen wird.

Die zur Dampfbildung erforderliche Wärme wird in der Feuerungsanlage entwickelt und sodann an den Kessel übertragen. Diese Anlage zergliedert sich in drei Teile: a) die Feuerung, b) die Feuerzüge und c) der Schornstein.

In der Feuerung wird durch Verbrennen von Brennstoffen Wärme erzeugt und diese durch Leitung, Strahlung und Strömung der brennenden Stoffe an die Kesselwandungen übertragen; in den Feuerzügen geben die Feuergase ihre sogenannte freie Wärme an die Kesselheizflächen ab; der Schornstein zieht die zur Verbrennung erforderliche Luft in die Feuerung und treibt die Feuergase mit der notwen-

digen Geschwindigkeit durch die Feuerzüge und durch ihn ins Freie.

Die Wärmeleitung besteht hier in der Fortpflanzung der auf dem Rost erzeugten Wärme von einem Teilchen brennenden Brennstoffes auf das nächstliegende (innere Leitung), und in der Fortpflanzung der Wärme von einem Teilchen des brennenden Brennstoffes auf ein im Feuerungsraum oder Kesselzug befindliches Luftteilchen (äußere Leitung).

Die Wärmestrahlung besteht im Uebertritt der Wärme aus dem brennenden Brennstoff durch die Luft an die Kesselwandungen und von diesen an das im Kessel befindliche Wasser. Diese Fortpflanzung der Wärme erfolgt im Luftraum des Feuerungsraumes und der Kesselzüge in gerader Linie; beim Uebergang vom Luftraum in das Kesselblech tritt ebenso wie bei den Lichtstrahlen Brechung und Reflexion der Wärmestrahlen ein.

Trotzdem, daß Wasser und Luft schlechte Wärmeleiter sind, pflanzen sie wegen der leichten Verschiebbarkeit ihrer Teilchen die Wärme leicht fort. Diese Art der Wärmefortpflanzung bezeichnet man als Strömung der Wärme.

Bei einer Dampfantnahme aus dem Kessel kann eine weitere Dampfbildung entweder durch weitere Wärmezufuhr allein oder durch Wärmezufuhr mit nachfolgender Druckentlastung erfolgen. Während erstere Art häufiger geschieht, wird die zweite Art gewöhnlich nur dann angewendet, wenn in kurzer Zeit eine so große Dampfmenge erzeugt werden muß, daß sie der Kessel in dieser Zeit durch Wärmezufuhr allein nicht zu liefern vermag. Es ist daher geboten, daß der Kessel einen großen Wasserraum hat, damit er in kurzer Zeit große Dampfmen gen durch Druckentlastung bilden kann.

Die in der Feuerung entwickelte Wärme muß aus wirtschaftlichen Gründen gut ausgenutzt werden. Dies kann aber nur erfolgen, wenn die sich im Kesselwasser bildenden Dampfblasen, die sich an die Heizflächen anhaften und dadurch das Wärmeleitvermögen der Kesselwand herabsetzen, möglichst rasch von ihr wegkommen. Dies geschieht am zweckmäßigsten und raschesten durch einen ausgiebigen Wasserumlauf im Kessel. Erfolgt eine solche Ableitung der Dampfblasen von der Kesselwandung nicht, dann tritt eine Wärmestauung ein, die nicht nur einen Abfall an im Brennmaterial steckender, bzw. entwickelter Energie zur Folge hat, sondern, wenn die Behinderung der Ableitung der Dampfblasen zu weit getrieben wird, kann es sogar zu einer Ueberhitzung und Erglühung des Kesselbleches kommen, das natürlich die schwersten Folgen nach sich ziehen kann.

Durch Entfernen der Luft aus dem Kesselwasser wird auch der Siedepunkt desselben

erhöht. Im Wasser befindliche kleine Luftblasen werden bei der Erhitzung zu Dampfblaschen. Ist die Temperatur so hoch gestiegen, daß die Spannung des Dampfes gleich dem äußeren, auf dem Wasser lastenden Druck wird, so steigen die Dampfblaschen auf. Enthält das Wasser keine Luftblasen, so muß die Temperatur noch höher steigen, das Wasser ist dann überhitzt und es tritt Siedeverzug ein. Bei einer solchen erhöhten Temperatur stattfindende Dampfbildung tritt sehr rasch und energisch auf, welche Erscheinung aber keineswegs, wie man früher glaubte, Ursache der Dampfkesselexplosionen ist.

Zur Vermeidung von Energieverlusten muß nicht nur die in der Feuerung entwickelte Wärme gut ausgenützt werden, sondern im Kessel auch ein ausgiebiger Wassenumlauf stattfinden. Dieses deshalb, weil die erwärmten und dadurch spezifisch leichter gewordenen Wasserteile in die Höhe steigen und hier ihre Wärme abgeben. Die oben befindlichen Wasserteilchen sinken an ihre Stelle herab; der dadurch entstandene Kreislauf des Wassers erwärmt dieses durchwegs, es gerät ins Sieden und Dampfbilden. Je intensiver und rascher ein solcher Wassenumlauf ist, umso stärker wird also eine Dampfbildung vor sich gehen.

Wie wir gesehen haben, setzt sich Wärme in Energie um. Doch findet dies nicht mit jedem Wärmemolekül statt, indem Wärmeverluste eintreten. Mit diesen Wärmeverlusten sind daher Energieverluste verbunden. Die Wärmeverluste einer Dampfkesselanlage können in direkte und indirekte geschieden werden.

2. Ermittlung der durch die direkten Wärmeverluste hervorgerufenen Energieverluste.

Sobald das Brennmaterial auf dem Rost brennt, entwickelt es Wärme; da diese in Arbeit umgewandelt werden soll, soll sie voll ausgenützt werden. Praktisch läßt sich dies natürlich nicht erreichen, denn es werden auch bei sorgsamster Betriebsführung Verluste an Wärme auftreten, Verluste, die nicht zu verhindern sind, die also mit in Kauf genommen werden müssen, weil sie eben unvermeidlich sind im Gegensatz zu den behebbaren, verhinderbaren Wärmeverlusten.

Der Verbrennungsvorgang mit seinen vermeidlichen und unvermeidlichen Verlusten muß fortwährend studiert werden, um den höchsten thermischen Wirkungsgrad zu erzielen. Der Heizer muß angewiesen werden, wie er seine Feuerung zu bedienen hat, um eben einen solchen Wirkungsgrad zu erreichen. Bei Unterwindfeuerung ist auch eine fortlaufende Untersuchung der Heizgase notwendig, weil bei

ihnen, besonders bei Handbeschickung, nicht nur Luftüberschuß, sondern auch Luftmangel und dadurch Verluste durch unverbrannte Gase auftreten können (Abhilfe durch Zufuhr von Oberluft an der Feuertür!).

Nur bei Erreichung des höchsten thermischen Wirkungsgrades kann die Wärme restlos ausgenützt werden. Man versteht unter Wärmeausnützung das Verhältnis jener Wärmemenge, die von 1 kg Brennstoff zur Dampferzeugung (und eventuellen Dampfüberhitzung) nutzbar gemacht wurde zum Heizwert des Brennstoffes. Mathematisch ausgedrückt ist die Wärmeausnützung

$$\eta = \frac{\lambda \cdot v_b}{W} \dots \dots \dots (1)$$

habei ist λ = Erzeugungswärme des Brennmaterials, v_b = Bruttoverdampfungsgröße des Brennstoffes, W = Heizwert des Brennmaterials.

Diese Wärmeausnützung soll bei guter Kohle nicht unter 70% sein.

Im allgemeinen setzen sich bei einer Dampfkesselanlage die direkten Wärmeverluste zusammen aus:

- a) Anheizverlust;
- b) Verlust, entstanden durch die unvollkommene Verbrennung des Brennstoffes auf dem Rost;
- c) Verlust, entstanden durch das in den Herdrückständen (Schlacke) noch enthaltene Brennbare, sowie aus den durch den Rost fallenden unverbrannten Brennstoffteilen und durch die Flugkoksverluste;
- d) Verlust, der durch die in der heißen Asche und Schlacke noch steckende Wärme entsteht;
- e) Verlust durch unverbrannte Gase;
- f) Verlust durch den Rußgehalt der Abgase;
- g) Verlust durch die Strahlung der Feuerung;
- h) Verlust, entstanden dadurch, daß die Heizgase, die Kohlenoxyd infolge unvollkommener Verbrennung enthalten, die Kesseldzüge mit einer Temperatur verlassen, die höher ist, als die der Außenluft (Wärme, die in den Rauchgasen steckt);
- i) Verlust durch Strahlung und Leitung an die Außenluft durch undichte Einmauerung, bzw. Umhüllung des Kessels;
- j) Verlust durch Abkühlung des Kessels infolge Betriebsstillstand.

Vor der Ermittlung dieser Einzelverluste und deren Beseitigung ist jedoch durch Betriebsversuche bei verschiedenen Belastungen festzustellen, bei welcher Kesselbelastung der thermische Wirkungsgrad am günstigsten ist