

Viertes Kapitel.

Der Verbrennungsverlust.

Bei einer Dampfmaschinenanlage stehen der Brennstoff und die Verbrennungsprodukte durch den Aschenfall und den Schornstein dauernd in Kommunikation mit der äußeren Atmosphäre. Die Zustandsänderungen des Brennstoffes, der Luft und der Verbrennungsprodukte finden daher bei konstantem atmosphärischen Druck statt. Dieser Verlauf der Vorgänge ist für den erzielbaren Wirkungsgrad der Anlage von erster Bedeutung. Die Energie des Brennstoffes und der Verbrennungsluft ist bei dem betrachteten Beispiele mit 7000 Kalorien angenommen worden. Es fragt sich, wieviel von diesen 7000 Kalorien überhaupt und im besten Falle mit Hilfe einer verlustlosen Maschine nutzbar gemacht werden könnten. Fände die Verbrennung der Kohle bei der Dissoziationstemperatur der Verbrennungsprodukte statt, so könnte man sie zwar als reversiblen Vorgang betrachten, der aber immerhin, weil er an eine bestimmte Temperatur gebunden ist, einen notwendigen Effektverlust bedingt. Der Idealprozeß der Wärmeentwicklung und Wärmeabfuhr ginge alsdann bei der Dissoziationstemperatur T_a und der Temperatur der Umgebung t_0 vor sich. Mit Hilfe einer Carnotschen Maschine könnten

somit $7000 \left(1 - \frac{t_0}{T_d}\right)$ Kalorien als mechanische Arbeit hervorgebracht werden. Nimmt man die Dissoziationstemperatur mit 2500°C. an, so ergibt sich ein Wirkungsgrad von $89,6\%$. Der unvermeidliche Verlust würde ungefähr 742 Kalorien betragen. Das Entropiediagramm ist in Fig. 6 dargestellt. Die Entropie erreicht den Wert 2,53 entsprechend dem Verluste $2,53 \times 293 = 742$ Kalorien.

Die Temperatur im Feuerraume der Dampfkesselfeuerungen wird selten höher als zu 1300°C. bestimmt, obwohl die Verbrennung der Kohle sicherlich bei viel höherer Temperatur vor sich geht, denn die Verbindung von Kohlenstoff und Sauerstoff findet nach ganz bestimmten und unabänderlichen Gewichtsverhältnissen statt, an welchen der vorhandene Überschuß des einen oder anderen Bestandteiles nichts zu ändern vermag. Aber die an der Verbrennung nicht unmittelbar beteiligten Bestandteile erwärmen sich an den entstehenden Verbrennungsprodukten, und es findet ein Ausgleich der Temperaturen statt, so daß das Maximum nicht beobachtet werden kann. Auch die den Feuerraum begrenzenden Wände, welche der Strahlung des Brennmaterials und

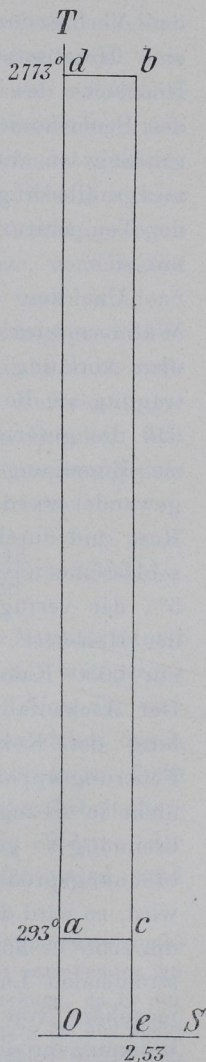


Fig. 6.

der Verbrennungsprodukte ausgesetzt sind, bewirken eine Herabsetzung der Mitteltemperatur. Bildet die Heizfläche des Dampfkessels eine teilweise Begrenzung des Feuerraumes, so ist die durch Strahlung und Berührung an die Heizflächenwand übertragene Wärmemenge allerdings nicht verloren, aber die Herabsetzung der Temperatur bringt einen notwendigen Effektverlust mit sich.

Um den durch die Art der Verbrennung und Wärmeentwicklung bedingten Verlust festzustellen, hat man vorläufig von allen Vorgängen der Wärmeübertragung an die Kesselwand abzusehen und anzunehmen, daß die gesamte verfügbare Energie des Brennstoffes zur Erzeugung der heißen Verbrennungsprodukte aufgewendet werde. Beim Aufwerfen der Kohle auf den Rost und durch die in der Asche und Schlacke eingeschlossenen unverbrannten Kohlenstücke gehen ungefähr 5% der verfügbaren Energie verloren, so daß, wenn der Heizwert von 1 kg Kohle 7000 Kalorien beträgt, nur 6650 Kalorien auf dem Roste entwickelt werden. Der Aschenfallverlust wäre durch sorgfältige Behandlung der Kohle bei zweckmäßiger Einrichtung des Feuerungsapparates vermeidlich; er wird daher hier nicht in Abzug gebracht. Ist die Luftzufuhr zur Verbrennung so geregelt, daß die Wärmekapazität der Verbrennungsprodukte bei konstantem Drucke $C_p = 4,5$ wird, so wird die Temperatur der Verbrennungsprodukte um 1555°C. höher als die Temperatur der zur Feuerung strömenden Luft sein. Bei einer Temperatur der Atmosphäre von 15°C. oder 288° abs. erreichen die Verbrennungsprodukte 1843° absolute Temperatur: Diese Temperatur heißt die theoretische Verbrennungstempe-

ratur. Aus den oben angedeuteten Umständen bleiben die Temperaturen der Verbrennungsprodukte bei den wirklich vollzogenen Verbrennungen weit unter den theoretisch berechneten Werten. Es überdecken sich nämlich die beiden Vorgänge der Wärmeentwicklung und der Wärmemitteilung. Wenn aber, wie dies hier geschieht, die Vorgänge getrennt in Betracht gezogen werden, so ist die Annahme, daß die ganze, vom Brennstoff entwickelte Wärme während eines verschwindend kleinen Zeitelements ganz in den Verbrennungsprodukten enthalten sei, nicht nur erforderlich, sondern auch vollkommen zulässig. Die Spannung der Verbrennungsprodukte ist gleich dem atmosphärischen Drucke. Mit Hinsicht auf den Normalzustand der Verbrennungsprodukte bei 288° ergibt sich somit die Entropie

$$S = C_p \log \text{nat} \frac{T}{t_0} = 4,5 \log \text{nat} \frac{1843}{288} = 8,353.$$

Die zur Überführung in den Normalzustand erforderliche Wärmeabfuhr muß somit wenigstens $8,353 \times 288 = 2406$ Kalorien betragen. Von der verfügbaren Energie des Brennstoffes könnten daher durch eine periodisch wirkende Maschine höchstens $7000 - 2406 = 4594$ Kalorien als mechanische Arbeit hervorgebracht werden¹⁾. Wie immer die Wärme der Verbrennungsprodukte weiter verwendet wird, und

¹⁾ Diesen Wert heißt Zeuner (Technische Thermodynamik) Arbeitswert der Steinkohle. Es wäre vielleicht zutreffender ihn Arbeitswert der Verbrennungsprodukte zu benennen, da er nur vom Zustand der Verbrennungsprodukte abhängig ist und somit für eine und dieselbe Steinkohle sehr verschiedener Größe sein kann.

welcher Maschinen immer man sich zur Hervorbringung der mechanischen Arbeit bedienen mag, die Ausbeute kann unmöglich mehr als 4594 Kalorien betragen. Wenn die Verbrennungsprodukte einmal den Zustand, der durch den atmosphärischen Druck und die Temperatur von 1843° abs. oder die Entropie 8,353 gekennzeichnet wird, erreicht haben, ist die später folgende Einbuße von 2406 Kalorien an mechanischer Arbeit unabänderlich bestimmt. Dieser Arbeitsverlust ist durch die gewählte Art der Verbrennung bedingt, man kann ihn also Verbrennungsverlust heißen.

Im Entropiediagramm Fig. 7 bezeichnet Punkt *b* den Zustand der Verbrennungsprodukte bei 1843° abs. Der Idealprozeß, wodurch die Verbrennungsprodukte in den Normalzustand gebracht werden, ist durch die Linie *bca* angegeben. Der Verbrennungsverlust ist durch die Fläche *Oacd* = 2406 Kalorien dargestellt. Die relative Größe des Verbrennungsverlustes beträgt $2406 : 7000 = 0,344$ oder $34,4\%$. Diese Ermittlungen können in folgendem Satze zusammengefaßt werden: In einer Umgebung von 15° C. ist es unmöglich, mittels einer periodisch wirkenden Maschine, welcher man Kohle von 7000 Kalorien Heizwert kontinuierlich zuführt, mehr als 65% des Heizwertes der aufgewendeten Kohle an mechanischer Arbeit hervorzubringen, wenn die Kohle in der Maschine unter konstantem Drucke so verbrannt wird, daß die höchste Temperatur der Verbrennungsprodukte 1843° abs. beträgt.

Aus den Resultaten von Heiz- und Verdampfungsversuchen kann in der Regel ein Nutzeffekt der Dampfkesselanlage von $60\text{--}75\%$ herausgerechnet werden, während aus den Untersuchungen der dazu gehörigen

Dampfmaschine ein thermischer Wirkungsgrad der Maschine allein von etwa 10—18% ermittelt wird. Dadurch kann die Meinung erweckt werden, daß von den

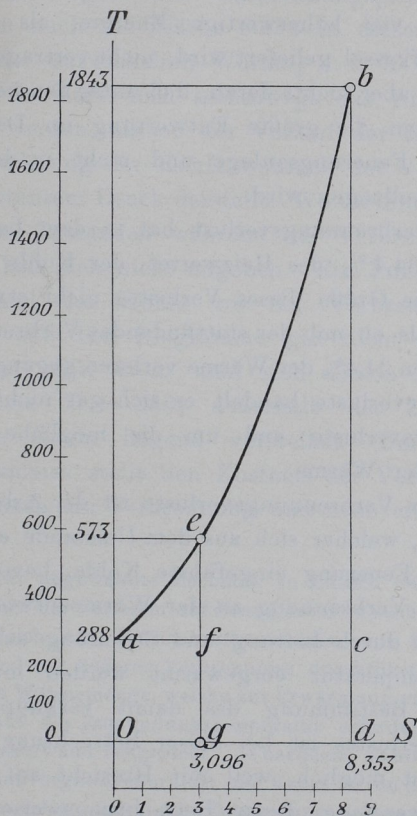


Fig. 7.

beiden Bestandteilen der Anlage, nämlich Dampfkessel und Dampfmaschine, es wesentlich die Schuld der Dampfmaschine sei, daß der Gesamteffekt auf so niedriger Stufe bleibt. Dies ist aber gerade das Gegenteil

der tatsächlichen Verhältnisse. Die Entwertung der Energie fällt zum größten Teile dem Dampfkessel zur Last. Es ist zwar richtig, daß unsere heutigen Dampfmaschinen viel höherwertige Energie, als sie ihnen vom Dampfkessel geliefert wird, nicht vertragen können; dies ändert aber nichts daran, daß unter den bestehenden Verhältnissen die größte Entwertung im Dampfkessel und seiner Feuerungsanlage und nicht in der Dampfmaschine vollzogen wird.

Der Verbrennungsverlust hat in dem betrachteten Beispiele 34,4 % des Heizwertes der Kohle betragen; doch ist die Größe dieses Verlustes nicht etwa so aufzufassen, als ob mit der stattfindenden Verbrennung der Kohle schon 34,4% der Wärme verloren gegangen wären. Um Wärmeverluste handelt es sich gar nicht, sondern um Arbeitsverluste und um die mögliche Nutzbarmachung der Wärme.

In dem Verbrennungsverluste ist der Arbeitsverlust inbegriffen, welcher sich aus dem Umstande ergibt, daß die in die Feuerung eingeführte Kohle, bevor sie sich durch ihre Verbrennung an der Wärmeentwicklung beteiligt, erst durch Leitung und Strahlung auf die Entzündungstemperatur vorgewärmt werden muß. Eine besondere Bestimmung des damit verknüpften Entzündungsverlustes ist bei dieser Betrachtung der Vorgänge nicht möglich, weil mit Hinsicht auf die praktische Anwendung dieser Betrachtungsweise alle Berechnungen nur auf Grund der als wirklich erhobenen gedachten Zustände der Körper durchgeführt werden.¹⁾

¹⁾ In einer interessanten Studie, welche Prof. M. Jouguet unter dem Titel „Sur la théorie des moteurs thermiques“ dem

Das Diagramm Fig. 7 verdient eine genauere Betrachtung. Die Linien ba , bc und ca stellen umkehrbare Zustandsänderungen der Verbrennungsprodukte dar. Wenn nun auch die Fläche $Oabd$ in diesem Falle als ein Maß der entwickelten Wärme, d. i. 7000 Kalorien, erscheint, so darf doch keineswegs das Diagramm so aufgefaßt werden, als ob der Verlauf der Linie ab die Zustandsänderung der Kohle während der Verbrennung unter konstantem Druck darstelle. Wo die Punkte liegen, welche den Zuständen während der Verbrennung entsprechen, läßt sich nicht angeben. Ein Punkt, welcher den Zustand der Kohle vor der Verbrennung darstellt, ist auf dem Diagramme gar nicht gezeichnet. Wenn man will, kann man sich diesen Punkt mit der Ordinate $T = 288$, außerhalb der Zeichnungsebene, im Raum liegend vorstellen. Der Punkt a des Diagrammes stellt den Zustand der Verbrennungsprodukte nach der Verbrennung und nach erfolgter Ab-

Kongresse für angewandte Mechanik in Lüttich 1905 vorgelegt hat, und worin der Verfasser auf Grund des Gouyschen Theorems einen Vergleich von Wärmekraftmaschinen mit innerer Verbrennung und mit äußerer Verbrennung durchführt, ist der Arbeitswert der Wärmemenge, welche zur Erwärmung von Brennstoff und Luft auf die Entzündungstemperatur erforderlich ist, als Entzündungsaufwand festgestellt. Je nachdem, ob man es also mit kalter oder mit vorgewärmter Luft und Kohle zu tun hat, käme ein Entzündungsverlust oder ein Entzündungsaufwand oder, bei ungenügender Vorwärmung, beides zugleich in Betracht. Aus den Zuständen vor und nach der Verbrennung kann aber außer dem Gesamtverbrennungsverluste nur der Entzündungsaufwand besonders bestimmt werden. Dieser ist bei den Dampfkesselfeuerungen, die mit nicht vorgewärmter Luft arbeiten, gleich Null.

kühlung auf die Temperatur der Umgebung von 288° vor. Wie aber der Übergang von dem Punkte, der den Zustand der Kohle vor der Verbrennung darstellt, zum Punkte b erfolgt, darüber gibt das Diagramm keine Auskunft. Die Koordinaten des Punktes b sind aus den Zustandskennzeichen der Verbrennungsprodukte berechnet worden, und die Linie ba stellt die Zustandsänderung der Verbrennungsprodukte während einer ideellen, umkehrbar bewirkten Abkühlung bei konstantem Drucke vor, während dieselbe Linie, in der Richtung ab betrachtet, die Zustandsänderung der Verbrennungsprodukte während einer ideellen, umkehrbar bewirkten Erwärmung vorstellt.

Die Energie der Verbrennungsprodukte in dem Zustande, der durch den Punkt b des Diagramms gekennzeichnet wird, beträgt mit Bezug auf den Normalzustand der Verbrennungsprodukte bei 15° C. und atmosphärischem Druck 4968 Kalorien. Führt man also die Verbrennungsprodukte, deren Temperatur 1843° beträgt, auf irgend eine Weise in den Normalzustand über, so beträgt die algebraische Summe der gewonnenen Arbeits- und Wärmemengen 4968 Kalorien. Hingegen hat die Kohle bei ihrem Übergang in den Normalzustand 7000 Kalorien ergeben. Die Differenz von 2032 Kalorien kommt, wenn die Verbrennung unter konstantem Drucke vor sich geht, als mechanische Arbeit der Volumsvermehrung zum Vorschein. Indessen ist die oben gemachte Annahme, daß die Verbrennung auf den Rosten der Dampfkessel unter konstantem atmosphärischen Drucke vor sich geht, nur annäherungsweise richtig. Tatsächlich findet die Verbrennung unter veränderlichem Drucke statt, denn infolge der Schornstein-

wirkung bestehen zwischen Aschenfall, Feuerherd, Feuerzügen und Schornstein Druckdifferenzen. In den Feuerzügen stehen die Verbrennungsprodukte unter geringerem als atmosphärischem Drucke, und die Arbeit, welche die Luft beim Eintritte durch die Rostspalten und die Lücken des Brennmaterials leistet, indem sie auf den geringeren Druck expandiert, erscheint als kinetische Energie der Verbrennungsprodukte, die mit einer gewissen Geschwindigkeit durch die Feuerzüge strömen. Mit der Beschleunigung der Verbrennungsprodukte wäre ein Arbeitsverlust auch dann verknüpft, wenn die kinetische Energie schließlich durch Reibung wieder ganz in Wärme zurückverwandelt werden könnte. Nun beträgt aber die lebendige Kraft der aus je 1 kg sekundlich verfeuerter Kohle entstehenden Verbrennungsprodukte, wenn diese mit einer Geschwindigkeit von 10 m pro Sekunde durch die Züge strömen, ungefähr 100 kgm entsprechend 0,24 Kalorien. Dieser Arbeitsverlust ist demnach so gering, daß er praktisch vernachlässigt werden kann.

Bei einer Dampfkesselanlage wird die Wärme des Feuers und der Verbrennungsprodukte benützt, um das in einen Dampfkessel eingeführte Speisewasser in Dampf von bestimmter Spannung zu verwandeln. Die Wärme, welche die Verbrennungsprodukte bei ihrem Wege durch die Feuerzüge des Dampfkessels abgeben, soll möglichst vollständig von dem Dampfkesselinhalte aufgenommen werden. In welchem Maße dies erreicht werden kann, hängt von der Konstruktion des Dampfkessels ab. Sind die Begrenzungen der Feuerzüge teilweise durch Mauerwerk gebildet, so findet die durch Berührung von den Verbrennungsprodukten an das Mauerwerk abgegebene

Wärme durch die Leitungsfähigkeit des Mauerwerks einen Weg in die Umgebung und geht direkt verloren, andererseits strömt durch die Fugen des Mauerwerkes Luft in die Verbrennungsprodukte und bewirkt durch den Wärmeaustausch und die Vergrößerung der Wärmekapazität eine Vergrößerung der Entropie und damit auch eine Vermehrung der Arbeitsverluste. Auch bei innen gefeuerten Kesseln, deren Rauchzüge zum größten Teile durch Heizflächenwandungen begrenzt sind, treten Wärmeverluste, wenn auch in geringerem Maße als bei außen gefeuerten Kesseln, auf. Alle diese Verluste werden bei dem dieser Betrachtung zugrunde gelegten Beispiele nicht berücksichtigt, nicht aber etwa aus dem Grunde, weil sie zu vernachlässigen sind, sondern weil die Betrachtung vorläufig vollkommene Einrichtungen zur Voraussetzung nimmt, um die hauptsächlich und wesentlichen Verluste von den, allgemein gar nicht feststellbaren, unwesentlichen zu trennen.
