

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 hauptsächlichsten und wesentlichen Verluste von den, allgemein gar nicht feststellbaren, unwesentlichen zu trennen.

---

## Fünftes Kapitel.

### Der Heizungsverlust. — Der Essengasverlust.

Die Vorgänge, welche nun zu betrachten sind, spielen sich zwischen den Verbrennungsprodukten und dem Dampfkesselinhalte ab. Es sei vorausgesetzt, daß es sich um die Erzeugung von Dampf von 11 Atm. absoluter Spannung handelt, dessen Temperatur  $183^{\circ}$  C. oder  $456^{\circ}$  abs. beträgt. Den Verbrennungsprodukten gegenüber verhält sich der Dampfkessel so wie ein kalter Körper. Die Temperatur der äußeren Wand wird hauptsächlich davon abhängig sein, aus welchem Materiale die Wand des Dampfkessels besteht. Da die Wand in der Regel außen mit Ruß und innen mit Kesselstein belegt ist, so kommen auch diese Verunreinigungen und deren Stärken ebenso wie die eigentliche Materialstärke in Betracht. Wieso diese Umstände alle dazu beitragen, künftige Arbeitsverluste nach sich zu ziehen, ohne daß sie Wärmeverluste bedingen, kann an dieser Stelle noch nicht erörtert werden; vorläufig bleiben sie unberücksichtigt. Es sei daher angenommen, der ganze Kesselinhalt, Wasser und Dampf, habe die Temperatur von  $456^{\circ}$  abs. und die Wärme der Verbrennungsprodukte werde direkt auf den Kesselinhalt übertragen, wodurch ein Teil des Wassers in Dampf verwandelt wird, der in die Dampfleitung abströmt, während

eine entsprechende Menge heißen Speisewassers in den Kessel eingeführt wird. Wenn sich dabei die Verbrennungsprodukte ebenfalls auf  $456^{\circ}$  abs. abkühlen sollten, so müßte die Heizfläche des Dampfkessels sehr groß sein. Um innerhalb des Rahmens praktischer Erfahrungen zu bleiben, sei angenommen, die Verbrennungsprodukte kühlen sich an dem Dampfkessel nur bis zu  $300^{\circ}$  C. oder  $573^{\circ}$  abs. ab. Dabei werden höchstens

$$4,5 (1843 - 573) = 5715 \text{ Kalorien}$$

an den Kesselinhalt übertragen.

Um festzustellen, ob mit diesem Wärmeübergange künftige Arbeitsverluste verbunden sind, hat man den Wert der Entropie für den neuen Zustand mit dem ursprünglichen Werte der Entropie, welche für die Verbrennungsprodukte 8,353 betragen hat, zu vergleichen. Die Differenz wird ein Maß des neuerlich aufgelaufenen Verlustes sein. Die Entropie des ursprünglichen Kesselinhaltes ist nicht bekannt; ihr Wert sei  $S_a$ , dann ist die Größe der Entropie für den früheren Zustand:

$$S_a + 8,353.$$

Die Entropie der Verbrennungsprodukte bei  $573^{\circ}$  abs. beträgt:

$$4,5 \log \text{nat} \frac{573}{288} = 3,096,$$

und die Entropie des Kesselinhaltes samt dem neugebildeten Dampfe sei gleich  $S_b$ ; dann ist die Entropie des Systems im neuen Zustand:

$$S_b + 3,096$$

und die Differenz gegen früher:

$$S_b - S_a - 5,257.$$

Die Verdampfungswärme bei  $183^{\circ}$  C. beträgt 476 Kalorien pro Kilogramm Dampf. Da die Verbrennungsprodukte 5715 Kalorien abgegeben haben sollen, so könnten damit im besten Falle 12 kg Wasser verdampft werden. Um die Entropieänderung  $S_b - S_a$  kennen zu lernen, hat man einen umkehrbaren Prozeß zu ersinnen, wodurch nach stattgefundener Verdampfung der ursprüngliche Zustand des Kesselinhaltes wieder herbeigeführt wird. Die Summe der Quotienten, welche erhalten werden, wenn man die bei diesem imaginären Prozeß zuzuführenden oder abzuführenden Wärmemengen durch die Temperaturen dividiert, bei denen die Wärmeübergänge stattfinden, gibt alsdann den Wert der Differenz  $S_b - S_a$  an. Als einfachste umkehrbare Zustandsänderung kann man sich die isothermische Kompression des gebildeten Dampfes bis zu völliger Verflüssigung unter Anwendung eines Wärmereservoirs von  $183^{\circ}$  C. denken. Die abzuführende Wärmemenge ist alsdann der gesamten Verdampfungswärme gleich. Es ist demnach

$$S_b - S_a = 5715 : 456 = 12,535$$

und die Entropieänderung des ganzen Systems während der betrachteten Zustandsänderung

$$12,535 - 5,257 = 7,278.$$

Der Arbeitsverlust durch den Temperaturabstieg beträgt somit

$$7,278 \times 288 = 2096 \text{ Kalorien.}$$

Seine relative Größe ist  $2096 : 7000 = 0,299$  oder  $29,9\%$ .

Man kann diesen Verlust, der bei der Heizung eines Dampfkessels auftritt, Heizungsverlust nennen.

Von dem Heizwerte des Brennstoffes, 7000 Kalorien, können daher in diesem Stadium des Prozesses höchstens mehr

$$7000 - 2406 - 2096 = 2498 \text{ Kalorien}$$

oder 35,9% als mechanische Arbeit durch eine periodisch wirkende Maschine hervorgebracht werden, obwohl bisher, nachdem sowohl die Aschenfallverluste als auch alle Leitungs- und Strahlungsverluste unberücksichtigt geblieben sind, noch gar keine Wärmeverluste in Rechnung gezogen worden sind. Das System besteht jetzt aus den auf 300° C. abgekühlten Verbrennungsprodukten, dem ursprünglichen Kesselinhalte und 12 kg neugebildetem Dampf. Würde man durch irgend einen praktisch möglichen und ausführbaren Vorgang die Verbrennungsprodukte bei möglichst konstantem Drucke auf den Normalzustand zurückführen und den gebildeten Dampf bei 183° C. verflüssigen, so würde man nicht nur die vollen 7000 Kalorien des ursprünglichen Heizwertes an Wärme abzuführen haben, sondern noch um so viel Wärme mehr, als die Unvollkommenheiten der tatsächlichen Prozesse im Vergleiche zu den idealen umkehrbaren Prozessen einen größeren Aufwand mechanischer Arbeit erfordern.

Im Entropiediagramme Fig. 8 und im Wärmemengendiagramme Fig. 9 sind die eben betrachteten Zustandsänderungen anschaulich gemacht. Wenn die Verbrennungsprodukte auf 573° abs. abgekühlt sind, so wird ihr Zustand im Entropiediagramme Fig. 8 durch den Punkt *e* charakterisiert. Im Wärmemengendiagramme Fig. 9 ist  $Ocb_1$  die Wärmemenge, welche die Verbrennungsprodukte abgeben würden, wenn sie bei konstantem

Drucke bis auf den absoluten Nullpunkt abgekühlt werden könnten. Wenn die Verbrennungsprodukte bis auf  $573^{\circ}$  unter konstantem Drucke abgekühlt werden, so geben sie die Wärmemenge  $fcbe = a_1egh = 5715$  Kalorien an den Dampfkesselinhalt ab. Dieser nimmt sie aber nicht bei der Temperatur von  $573^{\circ}$ , sondern bei der Temperatur von  $456^{\circ}$  auf. Verwandelt man das Rechteck  $a_1egh$  in das flächengleiche Rechteck  $a_1ikl$ , so stellt dieses die vom Dampfkessel aufgenommene Wärmemenge dar. Da der Flächeninhalt von  $a_1ikl$  gleich 5715 und  $a_1i = 456$  ist, so ist die Strecke  $a_1l$  gleich 12,535 Längeneinheiten. Daß die Länge dieser Strecke zugleich ein Maß der Entropieänderung  $S_b - S_a$  bildet, trifft für das betrachtete Beispiel nur deshalb zu, weil angenommen worden ist, daß die ganze von den Verbrennungsprodukten abgegebene Wärmemenge nutzbar als Verdampfungswärme auf den Kesselinhalt übertragen worden ist. Aus den Erhebungen praktischer Versuche kann man aber immer eine wesentliche Differenz der beiden Beträge feststellen. Diese Differenz erscheint hier nicht, weil von allen Wärmeverlusten abgesehen worden ist. Betrachtet man  $a_1$  als Ursprung eines Koordinatensystems mit  $a_1b$  als Ordinatenachse und  $a_1l$  als Abszissenachse, so kann man diesen Teil der Fig. 9, mit dem Punkte  $k$  darin, auch als Entropiediagramm ansehen, in welchem der Punkt  $k$  den Zustand des Dampfkesselinhaltes und des neugebildeten Dampfes hinsichtlich des durch den Punkt  $i$  charakterisierten, vor der Verdampfung vorhandenen Normalzustandes des Dampfkesselinhaltes darstellt. Dann wäre Fig. 8 das Entropiediagramm für die Verbrennungsprodukte und Fig. 9, mit  $a_1$  als Ursprung des Koordinaten-Systems, das Entropie-

diagramm des Dampfkesselinhaltes und des Dampfes. Ursprünglich, als Punkt *b* in Fig. 8 den Zustand der Verbrennungsprodukte charakterisierte, betrug die En-

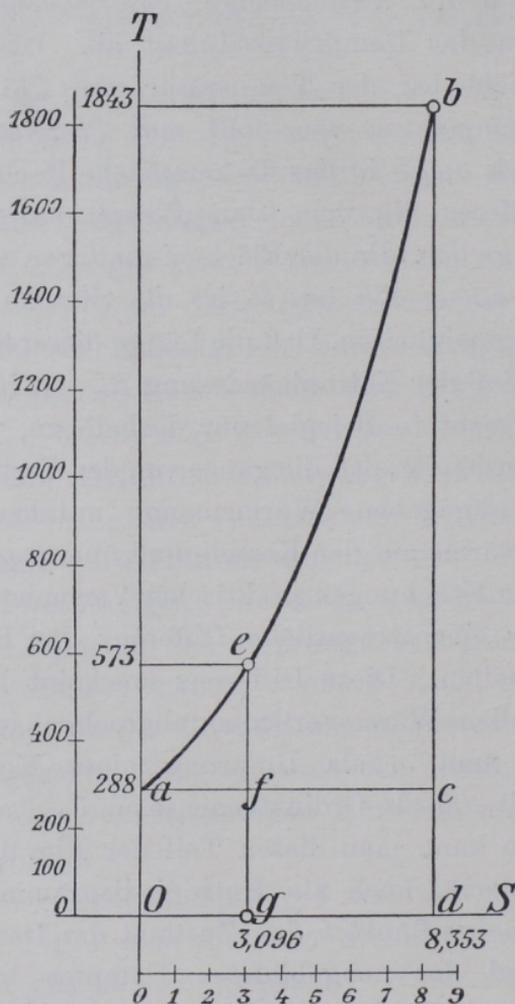


Fig. 8.

tropie der Verbrennungsprodukte 8,353, und die Entropie des Dampfkesselinhaltes war gleich Null. Als sich die Verbrennungsprodukte auf 573° abgekühlt hatten, betrug



Der Größenunterschied, welcher zwischen den Flächen  $a_1 a m l$  (Fig. 9) und  $g f c d$  (Fig. 8) besteht, stellt den durch die betrachtete Zustandsänderung bedingten Heizungsverlust von 2096 Kalorien dar.

Betrachtet man Fig. 9 wieder als Wärmemengendiagramm, in welchem die Fläche  $a_1 i k l$  gleich der Fläche  $f c b e$  ist, so erkennt man, daß bisher ein eigentlicher Wärme- und Energieverlust nicht stattgefunden hat. Ein solcher tritt erst ein, wenn man die Verbrennungsprodukte mit  $573^\circ$  aus der Anlage entweichen läßt, denn die Wärmemenge  $d f e a$ , welche die Verbrennungsprodukte bei ihrer Abkühlung unter konstantem Drucke bis auf die Temperatur der Umgebung noch abgeben könnten, geht damit verloren. Um den dadurch entstehenden Arbeitsverlust kennen zu lernen, hat man festzustellen, welche Entropievermehrung mit dieser Zustandsänderung verbunden ist.

Wenn die Verbrennungsprodukte in die Umgebung abströmen, so findet zuerst ein Wärmeaustausch mit den nächstbesten, ihnen im Wege stehenden Körpern statt; diese, welche sich dabei erwärmt haben, geben ihre Wärme wieder durch Leitung und Strahlung an andere noch kalt gebliebene Körper ab, bis in dem großen Reservoir der Umgebung die Temperatur wieder auf das ursprüngliche Niveau gesunken ist. Im Wärmemengendiagramm Fig. 9 stellt sich der Vorgang so dar, daß die Verbrennungsprodukte die Wärmemenge  $d f e a$  abgeben, während die Umgebung die Wärmemenge  $a_1 a p n$  aufnimmt. Sieht man nun wieder  $a_1$  als Ursprung des Koordinatensystems für ein Entropiediagramm und den Punkt  $a$  als Normalzustand der Umgebung an, dann ist die Strecke  $a_1 n$  ein Maß der Entropievermehrung

der Umgebung. Da die Verbrennungsprodukte bei der Abkühlung unter konstantem Drucke

$$4,5 (573 - 288) = 1282,5 \text{ Kalorien}$$

abgeben, ist die Strecke  $a_1n = 1282,5 : 288 = 4,453$  Längeneinheiten.

Da ferner die Entropie der Verbrennungsprodukte vor dieser Zustandsänderung 3,096 betrug, so ergibt sich die Entropievermehrung des Systems zu  $4,453 - 3,096 = 1,357$  und der hierdurch bedingte Arbeitsverlust zu  $1,357 \times 288 = 391$  Kalorien.

Die relative Größe dieses Arbeitsverlustes, welcher etwa *Essengasverlust* heißen mag, beträgt 5,6 %.

Von den ursprünglich verfügbaren 7000 Kalorien Heizwert bleiben somit in diesem Stadium nur mehr  $2498 - 391 = 2107$  Kalorien oder rund 30% übrig, die durch eine periodisch wirkende Maschine als mechanische Arbeit hervorgebracht werden könnten.

Die kleine dreieckige Fläche  $ae f$  in Fig. 8 ist ebenso groß als die Differenz der Flächen  $a_1apn$  in Fig. 9 und  $Oafg$  in Fig. 8. Wenn aber die Lage des Punktes  $e$  aus den Erhebungen tatsächlicher Beobachtungen bestimmt wird, muß diese Übereinstimmung keineswegs vorhanden sein. Es ist schon früher erwähnt worden, daß die Spannung der gasförmigen Verbrennungsprodukte bei ihrem Weg durch die Rauchzüge nicht auf konstanter Höhe bleibt; sind aber die Spannungen in den Punkten  $b$  und  $e$  nicht gleicher Höhe, dann liegt der Punkt  $e$  überhaupt nicht auf der gezeichneten Kurve. Da die Linien im Entropiediagramm nicht den Verlauf tatsächlicher Vorgänge, sondern imaginärer Prozesse bedeuten,

dürfen die von den Linien begrenzten Flächen auch nicht als Maße der ins Spiel tretenden Wärmemengen angesehen werden. Auch im folgenden Kapitel wird von diesem wesentlichen Unterschied zwischen Entropiediagrammen und Wärmediagrammen gesprochen werden müssen.

---