

## Sechstes Kapitel.

**Der Speisungsverlust. — Der Speisungsaufwand. — Der thermodynamische Wirkungsgrad der Kesselanlage.**

Bei der Berechnung des Heizungsverlustes ist angenommen worden, der ganze Kesselinhalt, Wasser und Dampf, habe die gleichmäßige Temperatur von  $456^{\circ}$  absolut. Da aber dem Dampfkessel fortwährend ebensoviel Speisewasser zugeführt werden muß, als Dampf aus dem Kessel abströmt, und das aus der Umgebung bezogene Wasser nur eine Temperatur von  $15^{\circ}$  C. hat, so kann die obige Annahme nur unter der Voraussetzung aufrecht erhalten bleiben, daß die Erwärmung des Speisewassers auf  $183^{\circ}$  C. im Inneren der Maschinenanlage auf irgend eine Art vorgenommen wird. Man könnte etwa die Essengase, die den Kessel mit  $300^{\circ}$  C. verlassen, bevor sie in die Atmosphäre entweichen, durch einen Economiser leiten oder man könnte von dem im Dampfkessel erzeugten Dampf einen Teil benützen, um die Vorwärmung des Speisewassers zu bewirken. Wenn der im Dampfkessel erzeugte Dampf zum Betriebe einer Auspuffmaschine benützt wird, so könnte der Auspuffdampf zur Vorwärmung verwendet werden, und hat man es mit einer Kondensationsmaschine zu tun, so kann entweder das Kondensat selbst oder erwärmtes Kühlwasser zur Kesselspeisung benützt werden. Je nach

dem angewendeten Verfahren fallen die künftigen Arbeitsverluste verschieden aus.

Zunächst ist der Arbeitsverlust festzustellen, den die Erwärmung des Speisewassers überhaupt bedingt. Dabei sei vorläufig angenommen, daß zur Erwärmung ein Teil des im Kessel erzeugten Dampfes benützt werde. Zur Erwärmung von 1 kg Speisewasser von  $15^{\circ}$  C. auf die Dampftemperatur von  $183^{\circ}$  C. sind rund 168 Kalorien erforderlich. Diese Wärme könnte durch die Kondensation von  $168 : 476 = 0,352$  kg Dampf geliefert werden. Das erwärmte Wasser und das entstandene Kondensat betragen dann zusammen 1,352 kg. Mit jedem Kilogramm frischen Speisewassers kehren 0,352 kg als Kondensat in den Kessel zurück; daher ist für 12 kg Dampf, der aus dem Kessel abströmt, eine Speisewasserzusatzmenge von  $12 : 1,352 = 8,875$  kg erforderlich. Die in Vergleich zu ziehenden Zustände sind also:

vor der Erwärmung:

8,875 kg Wasser von  $15^{\circ}$  C. und 12 kg Dampf,

nach der Erwärmung:

8,875 kg Dampf und 12 kg Wasser von  $183^{\circ}$  C.

Bestimmt man die Werte der Entropie für diese beiden Zustände, so gibt ihre Differenz ein Maß des mit der Erwärmung des Speisewassers verbundenen Arbeitsverlustes.

Der Unterschied der Entropiewerte für 12 kg Dampf und 12 kg Wasser von  $183^{\circ}$  C. ist schon oben berechnet worden, er beträgt 12,535. Um den Unterschied der Entropie von 8,875 kg Dampf und von 8,875 kg Wasser von  $15^{\circ}$  C. zu finden, denke man sich den Dampf zuerst

isothermisch unter Wärmeabfuhr bis zur völligen Verflüssigung bei  $183^{\circ}$  C. komprimiert und das entstandene Kondensat mit Hilfe zahlreicher Wärmereservoirs auf  $15^{\circ}$  C. abgekühlt. Die während der Kompression abzuführende Wärmemenge beträgt:

$$8,875 \times 476 = 4224,5 \text{ Kalorien.}$$

Daher ist die Entropie von 8,875 kg Dampf, auf den Normalzustand von Wasser von  $183^{\circ}$  C. bezogen:

$$4224,5 : 456 = 9,264.$$

Die Entropie von 8,875 kg Wasser von  $183^{\circ}$  C., auf den Normalzustand von Wasser von  $15^{\circ}$  C. bezogen, beträgt, wenn die spezifische Wärme des Wassers gleich 1 gesetzt wird:

$$8,875 \log \text{nat} \frac{456}{288} = 4,078.$$

Daher ist die Entropie von 8,875 kg Dampf, auf den Normalzustand von Wasser von  $15^{\circ}$  C. bezogen:

$$9,264 + 4,078 = 13,342.$$

Die Entropievermehrung durch die Erwärmung des Speisewassers beträgt somit

$$13,342 - 12,535 = 0,807$$

und der damit verknüpfte Arbeitsverlust

$$0,807 \times 288 = 232,4 \text{ Kalorien.}$$

Man kann ihn Speisungsverlust nennen. Seine relative Größe beträgt  $232,4 : 7000 = 0,0332$  oder  $3,32\%$ .

Von den ursprünglich verfügbaren 7000 Kalorien Heizwert bleiben somit in diesem Stadium nur mehr  $2107 - 232 = 1875$  Kalorien oder  $27\%$  übrig, die durch



den idealen Grenzfall zutreffend sein können. Die Linien  $ai$  und  $kq$  stellen die Verläufe von idealen umkehrbaren Prozessen dar, die nur zu dem Zwecke erdosen worden sind, die Längen der Abszissen der Punkte  $i$  und  $q$  zu finden oder die Entropie des Körpers aus den gegebenen Zustandskennzeichen zu berechnen.

Es wäre freilich viel einfacher, ja sogar plausibler, die Vorgänge so darzustellen, als ob die Kondensation des Dampfes durch die Wanderung eines Punktes längs der Linie  $kq$  dargestellt ist, wobei der Dampf die Wärmemenge  $lkqr$  an das Wasser abgibt, dessen Zustandsänderung während der Erwärmung durch die Wanderung eines Punktes von  $a$  nach  $i$  anschaulich gemacht würde, so daß die vom Wasser aufgenommene Wärme  $Oaiu$  gleich der vom Dampf abgegebenen Wärmemenge  $lkqr$  ist. Einer solchen Darstellung läge aber der Fundamentalirrtum zugrunde, daß sich wirklich Vorgänge nach dem Schema imaginärer umkehrbarer Zustandsänderungen abspielen, während von allen Möglichkeiten gerade diese ausgeschlossen ist. Die Linien, welche die in den beigedruckten Figuren dargestellten Entropie-Diagramme enthalten, bedeuten umkehrbare und daher unmögliche Prozesse, die Punkte hingegen entsprechen angenommenen und möglichen Zuständen der Körper.

Der Speisungsverlust muß nicht notwendigerweise stattfinden, wie folgende Erwägungen ergeben. Da über die Art der Maschine, in welcher der im Kessel erzeugte Dampf verwendet werden soll, noch gar keine Voraussetzung gemacht zu werden brauchte, so hat man in dieser Hinsicht noch alle Möglichkeiten offen.

Bei der Bestimmung des Heizungsverlustes hat sich ergeben, daß durch die von den Verbrennungsprodukten auf den Dampfkesselinhalt übertragene Wärmemenge von 1 kg Brennstoff im besten Falle 12 kg Dampf aus Wasser von  $183^{\circ}\text{C}$ . erzeugt werden können. Führt man kaltes Speisewasser in den Kessel ein, so erhält man für je 1 kg Brennstoff nur 8,875 kg Dampf und der als Speisungsverlust bezeichnete Arbeitsverlust beträgt 232 Kalorien oder 3,32% des Heizwertes der Kohle, weil die Erwärmung des Speisewassers auf die Dampftemperatur den Übergang der Wärme von höherer Temperatur zu niedriger Temperatur erforderlich macht, ohne daß eine entsprechende Arbeitsleistung dabei gewonnen werden kann.

Nun ist aber ein anderes Verfahren der Speisewassererwärmung denkbar, welches auf folgender Überlegung beruht. Aus der Umgebung, welche ein unerschöpfliches Wärmereservoir niedriger Temperatur bildet, können beliebig große Wärmemengen entnommen werden und die Träger dieser Wärmemengen, das sind die Körper, mit welchen gearbeitet wird, durch Aufwand mechanischer Arbeit auf höhere Temperatur gebracht werden. Man könnte also beispielsweise einen Luftkompressor benutzen, der atmosphärische Luft aus der Umgebung aufnimmt und sie auf hohe Spannung komprimiert, wobei die Wärme an Wasser abgegeben wird, das zur Kesselspeisung benutzt wird. Dies wäre ein rohes Bild der zugrundeliegenden Idee, das Speisewasser durch Aufwand mechanischer Arbeit zu erwärmen. Betrachtet man als Normalzustand den Zustand von 1 kg Wasser bei  $15^{\circ}\text{C}$ ., so beträgt die Energie von 1 kg Wasser von  $183^{\circ}\text{C}$ . ungefähr 168 Kalorien. Die

Entropie mit Hinsicht auf denselben Normalzustand beträgt

$$S = \log \text{ nat } \frac{456}{288} = 0,4595.$$

Die spezifische Wärme des Wassers ist hierbei gleich eins gesetzt worden, was streng genommen nicht richtig ist.<sup>1)</sup>

Wenn also Wasser aus dem durch die Temperatur von 183° C. gekennzeichneten Zustand in den Zustand von 15° C. Temperatur übergehen soll, so müssen wenigstens  $0,4595 \times 288 = 132$  Kalorien als Wärme abgeführt werden, und es können höchstens  $168 - 132 = 36$  Kalorien als mechanische Arbeit gewonnen werden.

Wenn umgekehrt 1 kg Wasser durch mechanische Arbeit von 15° C. auf 183° C. erwärmt werden soll, so müssen wenigstens  $36 \times 425 = 15300$  Kilogramm-meter Arbeit aufgewendet werden.<sup>2)</sup> In Wirklichkeit wird

<sup>1)</sup> Auf die Durchführung der Rechnungen unter Berücksichtigung der Veränderlichkeit der spezifischen Wärme mit der Temperatur kommt es hier nicht an. Wer mit den genauesten Zifferwerten rechnen will, findet diese in den gebräuchlichen Dampftabellen.

<sup>2)</sup> Es mag auf den ersten Blick unbegreiflich erscheinen, wieso ein Aufwand von nur 36 Kalorien mechanischer Arbeit zur Erwärmung von Wasser von 15° C. auf 183° C. ausreichen sollte. Der Prozeß müßte folgendermaßen geleitet werden: Das zu erwärmende Wasser wird in einem Zylinder eingeschlossen, dessen Wände den Wärmeaustausch mit der Umgebung nach Bedarf bald gestatten, bald verhindern. Durch Vergrößerung des dem Wasser eingeräumten Volumens mittels eines beweglichen Kolbens wird hierauf bei stetem Wärmezufuß aus der Umgebung ein Teil des Wassers zur Verdampfung gebracht. Die absolute Arbeit dieser isothermischen Expansion beträgt

natürlich viel mehr Arbeit aufgewendet werden müssen. Im Grenzfalle stellt aber diese Arbeitsmenge den Minimalaufwand mechanischer Arbeit dar, welcher zur Erwärmung des Speisewassers auf die Dampftemperatur erforderlich ist.

Der Speisungsverlust ist alsdann vollständig vermieden, an dessen Stelle tritt der Speisungsaufwand, der aber keinen Arbeitsverlust mit sich bringt. Für das betrachtete Beispiel hat sich ergeben, daß bei der Einführung kalten Speisewassers in den Dampfkessel durch die von den Verbrennungsprodukten gelieferte Wärme für je 1 kg Brennstoff 8,875 kg Dampf von 11 Atm. Spannung erzeugt werden.

Die Entropie von 8,875 kg Dampf, auf den Normalzustand von Wasser bei 15° C. bezogen, beträgt 13,34 Entropieeinheiten. Beim Übergang in den Normalzustand müssen daher wenigstens  $13,34 \times 288 = 3841$  Kalorien als Wärme abgeführt werden, und die höchstens zu gewinnende mechanische Arbeit beim Übergange in den Normalzustand ergibt sich aus dem Werte der Energie des Dampfes, wenn davon der als Wärme abzuführende Betrag abgezogen wird. Die Größe der Energie von 8,875 kg Dampf ist die algebraische Summe aller Arbeits- und Wärmemengen, die bei einem beliebig verlaufenden Übergange in den Normalzustand gewonnen werden. Wenn der Dampf durch Kompression bei

---

132 Kalorien. Hierauf wird der Wärmeaustausch mit der Umgebung unterbrochen und der vorhandene Dampf bis zu seiner gänzlichen Verflüssigung komprimiert, wozu ein Aufwand von 168 Kalorien absoluter mechanischer Arbeit erforderlich ist. Die Differenz zwischen aufgenommener und abgegebener mechanischer Arbeit beträgt somit 36 Kalorien.

183° C. verflüssigt wird, so werden dabei  $8,875 \times 476 = 4224,5$  Kalorien an Wärme frei. Die Größe der aufzuwendenden Kompressionsarbeit berechnet sich aus der Volumenverminderung, die für 1 kg Dampf 0,1797 cbm beträgt. Die Kompressionsarbeit bei 11 Atm. Spannung ist somit 19767 kgm oder 46,5 Kalorien und für 8,875 kg Dampf ergeben sich 413 Kalorien.

Bei der Abkühlung des Kondensates auf 15° C. werden  $8,875 \times 168 = 1491$  Kalorien abgegeben. Die Energie von 8,875 kg Dampf beträgt somit  $4225 - 413 + 1491 = 5303$  Kalorien und die maximale mechanische Arbeit, die beim Übergange in den Normalzustand gewonnen werden kann, beträgt  $5303 - 3841 = 1462$  Kalorien. Früher hat sich ergeben, daß nach Berücksichtigung des Speisungsverlustes höchstens 1875 Kalorien als mechanische Arbeit durch eine periodisch wirkende Maschine hervorgebracht werden können. Rechnet man zu den eben gefundenen 1462 Kalorien die Arbeit hinzu, welche während der Verdampfung geleistet wird und ebensogroß wie die Kompressionsarbeit von 413 Kalorien bei der Kondensation ist, so erhält man wie früher  $1462 + 413 = 1875$  Kalorien als maximal mögliche mechanische Arbeitsleistung.

Für das Arbeitsverfahren, welches den Speisungsverlust vermeidet, ergibt sich folgende Rechnung.

Durch die von den Verbrennungsprodukten auf den Dampfkesselinhalt übertragene Wärme werden 12 kg Wasser von 183° C. in Dampf von 11 Atm. Spannung verwandelt. Bezieht man wie früher alles auf den Normalzustand von Wasser bei 15° C., so ergibt sich die Entropie von 12 kg Dampf:

$$12,535 + 12 \log \text{nat} \frac{456}{288} = 18,03.$$

Beim Übergang in den Normalzustand müßten somit wenigstens  $18,03 \times 288 = 5192$  Kalorien als Wärme abgeführt werden.

Die Energie von 12 kg Dampf ist die algebraische Summe von  $12 \times 476 = 5715$  Kalorien an abzuführender Wärme während der Kondensation, von  $12 \times 46,5 = 558$  Kalorien an aufzuwendender Kompressionsarbeit und von  $12 \times 168 = 2016$  Kalorien an Wärme des Kondensates. Die Energie beträgt somit 7173 Kalorien, wovon beim Übergange in den Normalzustand höchstens  $7173 - 5192 = 1981$  Kalorien als mechanische Arbeit gewonnen werden können. Von diesen 1981 Kalorien Arbeit müssen  $12 \times 36 = 432$  Kalorien an mechanischer Arbeit aufgewendet werden, um das Speisewasser von  $15^\circ \text{C}$ . auf  $183^\circ \text{C}$ . zu erwärmen, damit die von den Verbrennungsprodukten an den Kesselinhalt übertragene Wärmemenge genüge, 12 kg Wasser zu verdampfen.

Die nach Abzug des Speisungsaufwandes verbleibende mechanische Arbeit beträgt somit  $1981 - 432 = 1549$  Kalorien, wozu noch 558 Kalorien als geleistete mechanische Arbeit während der Verdampfung kommen. Dieses Verfahren ergibt daher als maximal mögliche Ausbeute an mechanischer Arbeit  $1549 + 558 = 2107$  Kalorien, derselbe Wert, wie er ohne Abzug des Speisungsverlustes erhalten wurde.

Daraus ist zu ersehen, daß der Speisungsverlust nicht unabhängig von dem Arbeitsverfahren der Dampfmaschine (im engeren Sinne genommen) ist, und daß demnach die Entwertung der verfügbaren Energie durch den Speisungsverlust nicht mehr dem Kessel-

betriebe zuzuschreiben ist. Die unvermeidlichen Arbeitsverluste, welche mit dem Kesselbetriebe verbunden sind, beschränken sich somit auf den Verbrennungsverlust, den Heizungsverlust und den Essengasverlust. Für das betrachtete Beispiel ergaben sich

der Verbrennungsverlust mit . . . . .	34,4%
der Heizungsverlust mit . . . . .	29,9%
der Essengasverlust mit . . . . .	5,6%
die Arbeitsverluste des Kesselbetriebes mit	<u>69,9%</u>

des Heizwertes der Kohle.

Da unter den angenommenen Verhältnissen die vollkommenste Maschine nicht mehr als 30% des Heizwertes der Kohle als mechanische Arbeit hervorbringen vermag, stellt sich der Wert 0,30 als der thermodynamische Wirkungsgrad der Kesselanlage dar, wenn diese als Einrichtung zur Erzeugung des in der Maschine verwendeten Arbeitsmediums betrachtet wird.

Ist die Arbeitsweise der Dampfmaschine derart, daß der Kessel mit kaltem Wasser gespeist werden muß, so ergibt sich infolge der Unvollkommenheit der Maschine ein Speisungsverlust, dessen Größe, wie an dem betrachteten Beispiel gezeigt wurde, zu berechnen ist. Ist aber die Maschine mit Einrichtungen versehen, die es möglich machen, dem Kessel Wasser von höherer Temperatur, als die der Umgebung ist, als Speisewasser zuzuführen, so wird der Speisungsverlust geringer. Der dafür erforderliche Speisungsaufwand bedingt keinen Arbeitsverlust.

Der Unterschied, der zwischen Speisungsverlust und Speisungsaufwand besteht, kann folgendermaßen erklärt werden. Wenn die von den Verbrennungs-

produkten auf den Dampfkessel übertragene Wärme kaltes Speisewasser zu erwärmen und hierauf zu verdampfen hat, so kann im Kessel weniger Dampf erzeugt werden, als wenn das Speisewasser bereits auf die Dampftemperatur vorgewärmt in den Kessel eintritt. Auf den Normalzustand kalten Speisewassers bezogen, ist die Energie der größeren Dampfmenge, die bei der Verwendung heißen Speisewassers erzeugt werden kann, beträchtlich größer als die Energie der kleineren Dampfmenge, die aus kaltem Speisewasser erzeugt werden kann. Ebenso ist die maximale Arbeit, welche die größere Dampfmenge beim Übergange in den Zustand von Wasser der Dampftemperatur abzugeben vermag, größer als die maximale Arbeit, welche die kleinere Dampfmenge beim Übergange in den Normalzustand kalten Speisewassers leisten kann. Man kann daher auf einen Teil des Arbeitsüberschusses verzichten und dadurch den Speisungsverlust vermeiden.

Bei den industriellen Dampfmaschinen, welche das Speisewasser, im Falle einer Kondensationsmaschine mit ungefähr  $35^{\circ}$  C. oder im Falle einer Auspuffmaschine mit Vorwärmer etwa mit  $90^{\circ}$  C. zur Kesselspeisung liefern, tritt bei verhältnismäßig geringem Speiseraufwand noch ein beträchtlicher Speiseverlust auf.

---