

Zwölftes Kapitel.

Die Heizung der Zylinderwände. — Die Dampfturbinen. — Der Rateausche Wärmespeicher. — Abwärme-Kraftmaschinen.

Der Abkühlungsverlust und der Rückströmungsverlust bedingen sich gegenseitig. Wenn während der Expansionsperiode vollständige Rückströmung der von der Zylinderwand bei der Initialkondensation aufgenommenen Wärme in den expandierenden Dampfkörper stattfinden könnte, träte weder ein Abkühlungsverlust noch ein Rückströmungsverlust ein. Findet hingegen während der Expansionsperiode gar keine Rückströmung der Wärme in den Dampfkörper statt, so tritt später das Maximum des Abkühlungsverlustes auf. Dieses Maximum wird bei teilweiser Rückströmung von der Summe der Abkühlungs- und Rückströmungsverluste nicht erreicht.

Der Vorteil der Anwendung stufenweiser Expansion in mehreren Zylindern beruht der Hauptsache nach in der Verminderung der Abkühlungsverluste. Bei einer Zweizylinder-Verbundmaschine finden Initialverluste im Hochdruckzylinder und im Niederdruckzylinder statt, hingegen wird der aus der Initialkondensation des Hochdruckzylinders hervorgehende Abkühlungsverlust ebenso wie der Rückströmungsverlust sehr gering.

Die Anwendung eines Dampfmantels bei Dampfmaschinen, die mit gesättigtem Dampf arbeiten, bewirkt

in erster Linie eine Verminderung des Initialverlustes und damit indirekt eine Verminderung der Abkühlungs- und Rückströmungsverluste. Hingegen ist mit dem Betrieb der Mantelheizung ein Heizungsverlust verbunden, der unter Umständen, wegen der schädlichen Wirkung des Dampfmantels während der Ausströmungsperiode, den mit der Verminderung des Initialverlustes herbeigeführten Gewinn illusorisch macht. Bekanntlich hat sich die Benutzung des Dampfmantels nicht in allen Fällen bewährt. Wenn die Mantelheizung nicht bewirken kann, die Temperatur der Zylinderwandung, mit welcher der beim Hubwechsel neu eintretende Dampf in Berührung kommt, auf eine wesentlich höhere Temperatur zu erwärmen, als der Spannung des abströmenden Dampfes entspricht, so wird ihr Einfluß gleich Null oder geradezu nachteilig. Die Nachteile kommen insbesondere dann zur Geltung, wenn der abströmende Dampf keiner weiteren Expansion in einem folgenden Zylinder zugeführt wird, sondern, wie bei Einzylindermaschinen, direkt in den Kondensator oder in die Atmosphäre abströmt. Die Erwärmung der Zylinderwand über die Temperatur, welche der Spannung des abströmenden Dampfes entspricht, kann aber nur dann gelingen, wenn die Wandungen vollkommen trocken sind. Zur Wiederverdampfung des durch die Initialkondensation niedergeschlagenen Wassers bedürfte man eines Dampfmantels nicht, denn die bei eben dieser Kondensation auf die Wände übertragene Wärme reicht vollkommen aus, bei sinkendem Dampfdruck die Verdampfung zu bewerkstelligen. Indem aber der Dampfmantel bewirkt, daß diese Verdampfung noch rechtzeitig während des Arbeitshubes geschieht, erfüllt er nur

einen Teil seiner Aufgabe. Indem er die Temperatur der trockenen Zylinderwand hierauf in die Höhe treibt, beschränkt er das Maß der Initialkondensation überhaupt. Die Größe der Initialkondensation ist jedenfalls von der Temperaturdifferenz zwischen der Zylinderwandung und dem einströmenden Dampf während der Admission abhängig. Reicht die vom Dampfmantel übertragene Wärme nicht aus, um das vom Frischdampf mitgerissene Wasser und das aus der Kondensation bei der Expansion entstehende Wasser zu verdampfen, so bleiben die Zylinderwände dauernd vom Wasser benetzt, und ihre Temperatur kann niemals die der Dampfspannung entsprechende Höhe überschreiten. Die Wirkung des Dampfmantels ist alsdann von gar keinem Vorteile begleitet. Der Zweck der Mantelheizung besteht viel weniger in einer Übertragung der Wärme auf den Inhalt als auf die Wandungen des Dampfzylinders. Dabei ist unter Wandung nicht die volle Materialstärke des Zylinders, sondern dessen innerste Schichten gemeint, denn es kommt auf die Temperaturen der Oberflächen an, die dem einströmenden Dampf im Verlaufe der Einströmung und während des Expansionsbeginnes dargeboten werden.

Ein Vorteil der Mantelheizung ergibt sich somit nur dann, wenn sie eine wesentliche Erwärmung dieser Schichten bewirken kann. Das Ausmaß des Wärmeaustausches zwischen Dampf und Zylinderwand kann bei jedem genau geführten Versuche annähernd genau festgestellt werden. Dieses Ausmaß ist beiläufig der Differenz der Wärmewerte des mit jedem Hub in die Maschine beförderten und des vom Indikator zu Ende der Füllungsperiode angezeigten Dampfes gleich. Der

Kompressionsinhalt ist dabei sinngemäß zu berücksichtigen. Diese Differenz gibt ein relatives Maß für die Temperaturdifferenz zwischen dem einströmenden Dampf und der dargebotenen Zylinderwand an. Man wird immerhin schließen dürfen, daß die Zylinderwandung um so heißer war, je geringer bei gleicher oder höherer Admissionstemperatur der Wärmeaustausch zwischen Dampf und Zylinderwand ausfiel. Bei den Versuchen, die die Herren Prof. Schröter und Dr. Koob an der bekannten van den Kerchoveschen Maschine ausführten, die einen durch strömenden Dampf geheizten Mantel besaß, betrug der Wärmeaustausch zwischen Dampf und Zylinderwand während der Einströmung bei gesättigtem Dampf von 180° ungefähr 75 Kalorien pro Kilogramm Dampf und bei überhitztem Dampf von 260° nur ungefähr 40 Kalorien pro Kilogramm Dampf, bei überhitztem Dampf von 350° nur 53 Kalorien pro Kilogramm Dampf. Berücksichtigt man die Füllungsverhältnisse und Dampfverbrauchsziffern, so geht zunächst daraus hervor, daß der Wärmeaustausch zwischen Zylinderwand und Dampf bei überhitztem Dampf ein geringerer als bei gesättigtem Dampf war, und es ist zu vermuten, daß die Zylinderwandungen, wozu auch die Deckelflächen und die sonstigen Begrenzungen des schädlichen Raumes gehören, bei Beginn der Admission sehr wesentlich wärmer als beim Betriebe mit gesättigtem Dampf waren.

Auch wenn die Zylinder nicht besonders geheizt sind, fließt den inneren Wandungen, die zeitweilig benetzt sind, Wärme durch Leitung des Materiales aus den vom Frischdampf dauernd berührten Oberflächen des Gußkörpers zu. Diese Wärme bewirkt bei trockener

Wandung ebensogut eine Steigerung der Wandtemperatur, wie sie die Mantelheizung vermag. Die Frage nach der Wirksamkeit eines Dampfmantels kommt sonach auf eine Bestimmung der mittleren Temperaturen der innersten Schichten hinaus. Kann diese Temperatur durch Anwendung eines Dampfmantels nicht so wesentlich gesteigert werden, daß die Beschränkung des Initialverlustes die vermehrten Leitungs- und Strahlungsverluste überwiegt, so ist die Verwendung des Dampfmantels nicht nur zwecklos, sondern geradezu nachteilig. Genauere Einsicht in diese Verhältnisse ist von Versuchen zu erwarten, bei denen neben der Feststellung des Dampfverbrauches und der Abnahme von Dampfdiagrammen auch die Temperaturen der Zylinderwandungen gemessen werden. Die Praxis hat sich indessen mehr und mehr dafür entschieden, bei Maschinen, die mit überhitztem Dampf betrieben werden, den Dampfmantel wegzulassen.

Unter Zwischenüberhitzung versteht man eine Einrichtung, durch welche der aus dem Hochdruckzylinder in den Niederdruckzylinder überströmende Dampf vom Frischdampf erwärmt wird, der zum Hochdruckzylinder strömt. Die hierdurch erzielte Beschränkung der Initialkondensation im Niederdruckzylinder kann hiebei so beträchtlich sein, daß der mit dieser Erwärmung verbundene Heizungsverlust dagegen nicht in die Wag-schale fällt. Der Vorteil der Anwendung eines Dampfmantels und der Zwischenüberhitzung hängt somit davon ab, ob der mit der Anwendung dieser Einrichtungen verbundene Heizungsverlust größer oder kleiner als die bewirkte Verminderung des Initialverlustes ausfällt.

Bei den Dampfmaschinen nach dem System Duchesne dient ein besonderer Dampfkessel zur Erzeugung des Manteldampfes, dessen Spannung wesentlich höher, als die Spannung des im Hauptkessel erzeugten Arbeitsdampfes der Maschine ist.¹⁾

Der Expansionsverlust fällt um so geringer aus, je weiter die Expansion des Dampfes in der Maschine arbeitsverrichtend ausgedehnt wird. Das Auftreten von Expansionsverlusten bei Kolbendampfmaschinen ist in deren Indikatordiagrammen an dem plötzlichen Druckabfall zu Ende der Expansionsperiode kenntlich. Bei den Dampfturbinen äußert sich der Expansionsverlust in der großen Geschwindigkeit, mit welcher der Abdampf aus der Turbine strömt. Aus den Gründen, welche auf Seite 98 besprochen wurden, findet bei den Kolbendampfmaschinen in der Regel ein ziemlich beträchtlicher Expansionsverlust statt. Bei den Dampfturbinen geschieht die Expansion des Dampfes entweder nur in den Düsen und Leitschaufeln (Aktionsturbinen), oder sie geht sowohl in den Leitapparaten wie in den Laufrädern vor sich (Reaktionsturbinen). Eine Reaktionsturbine mit ihren zahlreichen Leitkränzen und Laufrädern ist hinsichtlich der stattfindenden Expansion des Dampfes wie eine einzige komplizierte Düse mit drehbaren Bestandteilen zu betrachten, deren eines Ende mit dem Dampfkessel kommuniziert, während das andere Ende mit der äußeren Atmosphäre (Auspufturbine) oder mit dem Kondensator in Verbindung steht. An

¹⁾ G. Duchesne, Un système d'enveloppe particulièrement efficace Mémoire présenté au Congrès International de Mines etc. à Liège 1905.

diesem Ende herrscht somit immer die der Luftleere des Kondensators oder die dem Druck der Atmosphäre entsprechende Spannung. Bei normaler Geschwindigkeit der richtig konstruierten Turbine und bei gegebener Spannung im Kondensator kann die Spannung des Dampfes beim Eintritt in die Turbine eine ganz bestimmte Höhe nicht überschreiten. Ist die Dampfspannung höher, so muß die Turbine entweder mit größerer Geschwindigkeit laufen, oder es stellt sich beim Eintritt in die Düse automatisch ein entsprechender Drosselverlust ein. Ist die Dampfspannung hingegen niedriger, so läuft die Turbine entweder langsamer oder mit großen Reibungsverlusten in den Rädern. Nur bei der der Maximalleistung entsprechenden, vorteilhaftesten Ganggeschwindigkeit können die besten ökonomischen Effekte von Dampfturbinen erzielt werden.

Die Möglichkeit, die Expansionsverluste bei Dampfturbinen auf ein sehr geringes Maß herabzudrücken, macht diese Maschinen als Mittel geeignet, in ihrer Kombination mit Kolbendampfmaschinen auch die Kondensations- und Abwärmeverluste sehr zu beschränken. So ist es mit Hilfe des Rateauschen Wärmespeichers gelungen, den Auspuffdampf intermittierend arbeitender Maschinen (Fördermaschinen, Walzenzugmaschinen) noch in einer Turbine sehr vorteilhaft zu verwerten.¹⁾ Diese Wärmespeicher bestehen aus großen Blechgefäßen, in denen eiserne, mit Wasser und Eisenstücken gefüllte

¹⁾ Der Dampfakkumulator System Rateau, Zeitschrift der Dampfkesseluntersuchungs- und Versicherungs-Gesellschaft Wien 1901, auch Josse, Neuere Wärmekraftmaschinen, München und Berlin 1905.

Schalen so montiert sind, daß sie dem einströmenden Abdampf der Kolbenmaschinen große Oberflächen darbieten, an denen sich der Dampf niederschlagen und seine Wärme an die Wasser- und Eisenmassen abgeben kann. Diese aufgespeicherte Wärme dient, bei Unterbrechung oder Verzögerung des Zuflusses, zur Wiederverdampfung des Wassers unter dem geringeren Druck, unter dem der Akkumulator mit der daran angeschlossenen und mit Kondensation versehenen Dampfturbine steht.

Als ein anderes Mittel zur Beschränkung der Kondensations- und Abwärmeverluste sind die Abwärme-Kraftmaschinen zu betrachten, wie sie von Herrn Professor Josse und den Herren Behrend und Zimmermann angegeben und ausgeführt worden sind.¹⁾ Diese Maschinen benützen die Wärme des Abdampfes einer Wasserdampf-Maschine zur Verdampfung einer anderen Arbeitssubstanz (Schweflige Säure), deren Dämpfe bei niedriger Temperatur hohe Spannung besitzen. Diese Dämpfe werden hierauf in einem besonderen Zylinder arbeitsverrichtend expandiert.

Außer den hier in Betracht gezogenen Arbeitsverlusten treten beim Dampfmaschinenbetrieb noch zahlreiche andere Verluste auf. Insbesondere sind alle Leitungs- und Strahlungsverluste unbeachtet geblieben, die durch den Wärmeaustausch zwischen der Feuerungs- und Kesselanlage, den Dampfleitungen, der Dampfmaschine u. s. w. einerseits und der Umgebung andererseits hervorgebracht werden. Bei der Aufstellung der

¹⁾ Siehe Josse, Neuere Wärmekraftmaschinen, München und Berlin 1905.

Wärmebilanzen praktischer Versuche ergeben sich diese Verluste als Differenzen der von einem Körper des Systems abgegebenen und von einem zweiten Körper des Systems aufgenommenen Wärmemengen. Diese Fehlbeträge entsprechen Wärmemengen, die mittelbar oder unmittelbar schließlich in die Umgebung abfließen. Für jeden solchen Wärmeverlust muß ein entsprechender Arbeitsverlust in die Rechnung gestellt werden. Verliert ein Körper im Verlauf seiner Zustandsänderung, die mit einem Temperaturabfall von T_1 auf T_2 Grade absoluter Temperatur verbunden ist, eine Wärmemenge im Betrage von W Kalorien durch Leitung und Strahlung an die Umgebung von der Temperatur t_0 , so beträgt der entsprechende Arbeitsverlust

$$V = W - \frac{W t_0}{T_1 - T_2} \log \text{nat} \frac{T_1}{T_2} \text{ Kalorien.}$$

Der Entropiezuwachs des Systems infolge dieses Wärmeverlustes beträgt

$$S = \frac{W}{t_0} - \frac{W}{T_1 - T_2} \log \text{nat} \frac{T_1}{T_2}.$$

So führt jeder Vorgang zu einem Entropiezuwachs der Körper, die ihre Zustände verändern, entsprechend der Clausiusschen Formulierung des zweiten Hauptsatzes: „Die Entropie der Welt strebt einem Maximum zu.“