

Die Wärmepumpe und ihre Verwendung zum Verdampfen von Wasser und wässerigen Lösungen.

Von Dr. H. CLAASSEN.

(Eingeg. 30./4. 1921.)

Mit dem Namen der Wärmepumpe bezeichnet man neuerdings das bekannte Verfahren zur Verdichtung der in einem Verdampfer erzeugten Schwaden- oder Brüddämpfe auf die Spannung des Heizdampfes, um sie wieder als Heizdampf zu verwerten. Von diesem Verfahren verspricht man sich auf Grund theoretischer Erwägungen erhebliche Verbesserungen in der Wärmewirtschaft aller Betriebe, in denen größere Mengen Wasser zu verdampfen sind. Daß die Wärmepumpe, an und für sich betrachtet, große Ersparnisse an Brennstoffen bringen muß, wenn als Kraft zur Verdichtung der Dämpfe eine Naturkraft, wie Wasserkraft oder durch diese erzeugte elektrische Kraft, vorhanden ist, bedarf keiner weiteren Erörterung. Solche Fälle sind aber Ausnahmen; in den weitaus meisten Betrieben, für die eine Wärmepumpe überhaupt in Frage kommen kann, werden alle Kraftleistungen, also auch die für die Verdichtung der Dämpfe, durch Dampf- oder Verbrennungskraftmaschinen erzeugt.

Alle wärmewirtschaftlichen Untersuchungen haben ergeben, daß in industriellen Anlagen, in denen der Abdampf der Maschinen nutzbringend zum Anwärmen und Verdampfen verwertet werden kann, Kondensationsdampfmaschinen oder Verbrennungsmotoren trotz ihres geringen Dampf- oder Brennstoffverbrauches unwirtschaftlich sind. Daher darf auch die Wärmepumpe nicht durch Kondensationsdampfmaschinen oder Verbrennungsmotoren betrieben werden, sondern muß als Dampfmaschine mit Gegendruck gebaut werden; ihr Betrieb vermehrt also die Menge des Abdampfes erheblich. Da dieser zu Verdampf- und Anwärmezwecken ausgenutzt werden muß, so muß mit der Wärmepumpe auch eine zur Abdampfausnützung geeignete Verdampfanlage aufgestellt werden, oder eine bereits vorhandene in Betrieb bleiben, und die Wärmepumpe muß neben ihr oder besser in organischer Verbindung mit ihr arbeiten. Eine solche Verbindung ist in jeder Fabrik, je nach der Menge des überhaupt vorhandenen Abdampfes und den sonstigen für die Verdampfung obwaltenden Umständen, verschieden auszuführen, und dementsprechend wird auch die Wirksamkeit und der wirtschaftliche Nutzen der Wärmepumpe sehr verschieden sein. Es muß also für jeden Fall eine besondere Untersuchung und Berechnung stattfinden, in welcher Weise die Wärmepumpe an die Verdampfanlage anzugliedern ist und wie diese und die Wärmeanlage dann am zweckmäßigsten anzuordnen ist. Erst dann wird sich ergeben, welchen Nutzen die Wärmepumpe bringen kann oder ob sie überhaupt eine Dampfersparnis für die Gesamtanlage mit sich bringt, die nicht auch auf andere und einfachere Weise z. B. durch Vermehrung der Verdampfstufen der Verdampfanlage erzielt werden kann. Nicht darauf kommt es im praktischen Betriebe an, daß die Wärmepumpe Dämpfe verdichtet und wieder nutzbar macht, sondern darauf, daß für die gesamte Anlage einschließlich der Kräfteerzeugung weniger Dampf verbraucht wird, als bei der Arbeit ohne Wärmepumpe.

Für eine nutzbringende Wirkung der Wärmepumpe sind, abgesehen von ihrem Antrieb durch Naturkräfte, mehrere Bedingungen zu erfüllen, die zunächst erörtert werden sollen.

Bedingungen für den Betrieb einer Wärmepumpe.

1. Da die Kraftleistung für den Betrieb der Wärmepumpe ungefähr im gleichen Verhältnis zunimmt, wie der Druck der Dämpfe erhöht wird, so wird man die Spannungserhöhung möglichst niedrig wählen, um mit wenig Kraft auszukommen und die Abdampfmenge nur wenig zu vermehren. Die untere Grenze für die Drucksteigerung hängt von dem Temperaturgefälle ab, das für eine ausreichende Verdampfleistung nötig ist. Je größer die Heizfläche ist, desto kleiner kann das Temperaturgefälle sein, jedoch gibt es für jede Bauart der Verdampfer eine untere Grenze des Temperaturgefälles, die nicht unterschritten werden darf, wenn die Verdampfleistung noch genügend bleiben soll.

Verdampfer, bei denen auf der Heizfläche ein hoher Flüssigkeitsdruck lastet, brauchen ein höheres Temperaturgefälle, als Verdampfer, die mit niedrigem Flüssigkeitsstand betrieben werden und in denen durch die entwickelten Dampfblasen ein starker Flüssigkeitsstrom an der Heizfläche vorbei erzeugt wird. Mit dem geringsten Gefälle können Verdampfer arbeiten, in denen die Flüssigkeit in dünner Schicht über die Heizfläche rieselt. Leider hat sich noch keine der bisher empfohlenen und versuchten Bauarten dieser Verdampfer bewährt. Für die praktische Verwendung der Wärmepumpe wäre aber die Erfindung eines wirklich brauchbaren Rieserverdampfers von grundlegender Bedeutung, da bei ihm das Temperaturgefälle auf wenige Grade herabgedrückt werden könnte. Allerdings ist zu beachten, daß durch Rieserverdampfer auch die Wirkung einer vielstufigen Verdampfanlage durch Vermehrung der Stufen bei gleichbleibendem Gesamttemperatur-

gefälle erhöht werden könnte, worauf bei dem Vergleich und dem Wettbewerb dieser Anlage mit der Wärmepumpe zu achten ist.

2. Wenn Lösungen einzudampfen sind, dürfen sie nicht zu gehaltvoll sein oder zu stark eingedickt werden, da mit der Zunahme des Gehalts an gelösten Stoffen auch der Siedepunkt steigt. Um diese Erhöhung des Siedepunktes muß das nutzbare Temperaturgefälle erhöht werden und dementsprechend auch die Spannung des Heizdampfes. Im Allgemeinen wird man eine Siedepunkterhöhung von 10°C , die einer Drucksteigerung für den Heizdampf von etwa 0,4–0,5 at entspricht, als die Höchstzahl ansehen müssen, die für einen wirtschaftlichen Betrieb der Dampf-Wärmepumpe zulässig ist. Lösungen, die einen Gehalt haben, der eine höhere Siedepunktsteigerung bedingt, müssen daher in üblichen Verdampfanlagen weiter eingedampft werden. Damit wird die Anwendbarkeit der Wärmepumpe in der chemischen und Zuckerindustrie schon wesentlich eingeschränkt; am zweckmäßigsten erscheint hier die Angliederung der Wärmepumpe an den ersten Körper einer mehrstufigen Verdampfanlage, die gleichzeitig mit dem verdichteten Dampf und mit Abdampf oder Frischdampf beheizt wird. Zu beachten ist dann aber, worauf ich später noch eingehender zurückkommen werde, daß in dem ersten Körper viel mehr Wasser verdampft und die Lösung viel gehaltvoller werden muß als in dem ersten Körper der vielstufigen Anlage allein.

3. Die Überhitzung des verdichteten Dampfes muß vor dem Eintritt in den Verdampferheizraum aufgehoben werden, da überhitzter Dampf, solange er überhitzt bleibt, sich wie ein Gas bei der Wärmeübertragung verhält, also diese stark herabsetzt. Die Temperaturen des verdichteten Dampfes zeigt die folgende Tafel, wenn Dämpfe von 1 at verdichtet werden:

Tafel 1.

Verdichtung der Dämpfe auf	Temperatur d. verdichteten u. überhitzten Dampfes	Überhitzungsgrade
1,1 at	104,9 ⁰	3,1 ⁰
1,2 „	110,0 ⁰	5,8 ⁰
1,3 „	115,0 ⁰	8,5 ⁰
1,4 „	119,7 ⁰	11,0 ⁰
1,5 „	124,2 ⁰	13,4 ⁰
1,6 „	128,5 ⁰	15,8 ⁰
1,7 „	132,6 ⁰	18,1 ⁰
1,8 „	136,7 ⁰	20,4 ⁰
1,9 „	140,1 ⁰	22,1 ⁰
2,0 „	143,5 ⁰	23,9 ⁰

Ein einfaches Mittel, um die Überhitzung zu beseitigen, ohne ihre Wärme zu verlieren, besteht in der Einspritzung von Wasser, welches die Temperatur des gesättigten Dampfes hat, in den überhitzten Dampf vor seinem Eintritt in den Heizraum. Solches Wasser ist das in dem Heizraum verflüssigte; wird dieses in den überhitzten Dampf fein verteilt zerstäubt, so verdampft eine der Überhitzungswärme entsprechende Menge und vermehrt die Menge des ausnutzbaren Dampfes.

4. Wenn Kolbengebläse zur Verdichtung des Dampfes dienen, so muß das mit dem verdichteten Dampf mitgerissene Öl vor dem Eintritt in den Heizraum entfernt werden, da das Öl sonst an den Heizrohren anhaftet und den Wärmedurchgang stark verringert. Das Öl kann zum größten Teil durch die bekannten Ölfänger abgeschieden werden, aber nicht ganz vollständig, besonders deshalb nicht, weil die leichter flüchtigen Bestandteile des Öles durch den überhitzten Dampf verflüchtigt werden und sich erst wieder auf den Heizflächen als flüssiges Öl abscheiden. Dampf, der in Schleudergebläsen verdichtet wird, enthält kein Öl, aber diese haben den Nachteil des geringeren Wirkungsgrades, gebrauchen daher erheblich mehr Kraft, ungefähr 50 v. H. mehr als Kolbengebläse, und geben dementsprechend auch mehr Abdampf.

5. In den Heizraum darf keine Luft gelangen, da sie sich dort ansammelt und in kurzer Zeit größere Teile der Heizflächen bedeckt und der Berührung mit dem Dampf entzieht. Kann der Luftzutritt aber nicht vermieden werden, weil sich aus der zu verdampfenden Flüssigkeit Luft oder nicht verdichtbare Gase entwickeln, oder weil im Verdampfer unter Unterdruck verdampft wird und größere Luftmengen durch Undichtigkeiten eintreten, so müssen diese Luft- oder Gasmengen stetig durch passend an der Heizkammer angebrachte Abzugsrohre abgeführt werden. Die Luft ist aber nur unvollkommen von dem Dampf getrennt und läßt sich bei den hohen Dampfgeschwindigkeiten, die im Heizraum besonders nahe der Eintrittsstelle herrschen, auch niemals vollkommen von ihm trennen. Daher werden mit der Luft immer sehr große Mengen Dampf abgesogen, mindestens die hundertfache Menge der Luft. Es geht also ein merklicher Teil des verdichteten Dampfes verloren, für den erhebliche Kraftleistungen nutzlos aufgewendet sind. Für diese dem Kreislauf entzogenen Dampf-mengen muß natürlich auch Ersatz durch anderweitig hergestellten Dampf beschafft werden. Die Wärmepumpe sollte daher in den meisten Fällen nur zum Verdichten von Dämpfen über Atmosphärendruck dienen,

Der Dampfverbrauch der Verdampfanlagen mit Wärmepumpe ist mit den nötigen sonstigen Zahlen in den folgenden Tafeln 3 und 4 zusammengestellt.

Tafel 3.

Verdampfanlage mit Wärmepumpe zum Verdampfen von stündlich 3600 kg Wasser aus dünnen Lösungen.

Der Druck der Flüssigkeitsdämpfe wird von 1,0 auf 1,3 at, ihre Temperatur um 7,5° erhöht.

Art der Verdampf-anlage	Stündl. zu verdicht. Brüdenmenge		Dazu nötige Kraft		Stdl. Abdampfmenge		Entsprechend. Frischdampf		Ersparnis gegen vierst. Verdampf.		Im Körper I werden verdampft	
	kg	PS/St.	kg	kg	kg	kg	v. H. d. verdampften Wassers	v. H.	v. H.	v. H.	kg	v. H.
einstufig	2300	80	800	500	1300	1670	46,4	—	—	—	3600	100
zweistufig	1712	59	594	500	1094	1313	36,5	—	—	—	2806	78
dreistufig	1323	46	459	500	959	1151	32,0	2,0	—	—	2282	63
vierstufig	1051	37	365	500	865	1038	28,8	5,2	—	—	1916	53

Tafel 4.

Verdampfanlage mit Wärmepumpe zum Verdampfen von stündlich 3600 kg Wasser aus gehaltvolleren Lösungen.

Der Druck der Flüssigkeitsdämpfe wird um 0,5 at, ihre Temperatur um 11,7° erhöht.

Art der Verdampf-anlage	Stündl. zu verdicht. Brüdenmenge		Dazu nötige Kraft		Stdl. Abdampfmenge		Entsprechend. Frischdampf		Ersparnis gegen vierst. Verdampf.		Im Körper I werden verdampft	
	kg	PS/St.	kg	kg	kg	kg	v. H. d. verdampften Wassers	v. H.	v. H.	v. H.	kg	v. H.
einstufig	1962	114	1138	500	1638	1966	54,6	—	—	—	3600	100
zweistufig	1340	78	777	500	1227	1472	40,9	—	—	—	2567	71
dreistufig	985	57	569	500	1069	1282	35,6	—	—	—	2054	57
vierstufig	776	45	450	500	950	1140	31,7	2,3	—	—	1726	48

Aus den Tafeln ist zu entnehmen:

1. Der Kraftverbrauch der Wärmepumpe (Schleudergebläse) ist sehr groß, in den meisten Fällen wohl größer, als der der sämtlichen anderen Maschinen.

2. Eine Ersparnis an Frischdampf gegenüber der einfachen vierstufigen Verdampfanlage ist bei dünneren Lösungen nur bei der Angliederung der Wärmepumpe an eine drei- und vierstufige Verdampfanlage zu erzielen; bei den mit höherer Spannung des Heizdampfes verdampfenden gehaltvolleren Lösungen ist eine Ersparnis überhaupt nicht vorhanden.

3. Während in der vierstufigen Anlage im Körper I nur 31 v. H. des Wassers verdampft, wird darin infolge der Angliederung der Wärmepumpe mindestens die Hälfte des Wassers verdampft. Daher werden in ihm die Lösungen sehr häufig bereits einen solchen Gehalt erreichen, daß das Temperaturgefälle mehrere Grad erhöht werden muß. Für die meisten Verdampfanlagen in chemischen Fabriken und Zuckerfabriken wird die Tafel 4 gelten und demnach eine Ersparnis an Dampf durch die Wärmepumpe nicht mehr zu erzielen sein.

4. Wird als Wärmepumpe ein Kolbengebläse verwandt, so gestalten sich die Zahlen etwas günstiger, werden aber wohl durch die dabei auftretenden Übelstände, besonders durch die Herabsetzung der Wärmedurchgangszahl infolge des Ölgehaltes wieder verschlechtert.

Die vorstehenden Untersuchungen zeigen, daß die Wärmepumpe im allgemeinen nicht geeignet ist, die Verdampfanlagen in chemischen und Zuckerfabriken zu verbessern, daß sie im Gegenteil häufig den Gesamtdampfverbrauch erhöhen und den Betrieb erschweren wird. Die hohen Aufwendungen für die Beschaffung solcher Wärmepumpen mit den notwendigen Vergrößerungen der Heizflächen des ersten Verdampfers, an die sie angegliedert werden, sind daher sowohl in allgemein wirtschaftlicher, als auch in wärmewirtschaftlicher Hinsicht nicht gerechtfertigt.

Es erscheint richtig, zum Schluß noch einen Ersatz für die Wärmepumpen zu erwähnen, der ungefähr den gleichen Wirkungsgrad hat, wie das Schleudergebläse, aber nur geringe Anschaffungskosten erfordert; es ist das Dampfstrahlgebläse.

Das Dampfstrahlgebläse zum Verdichten von Brüden dämpfen.

Auch die Anwendung des Dampfstrahlgebläses zum Verdichten von Dämpfen auf höhere Spannung ist bereits lange bekannt und in der Zuckerindustrie schon vor 25 Jahren versucht worden. Damals konnten aber keine wesentlichen Erfolge damit erzielt werden, weil in den Zuckerfabriken, ebenso wie in anderen Betrieben, die meisten Dampfkessel nur eine verhältnismäßig niedrige Spannung von 5–6 at hatten und diese nicht ausreichte, um Abdampf von 1,5 at auf 2 at

und mehr mit ausreichender Wirkung zu verdichten. Dazu ist Kessel dampf von mindestens 8–10 at erforderlich. Mit solchem Dampf sollen die Strahlgebläse in bezug auf den Verbrauch an Betriebsdampf ungefähr die gleiche Wirkung wie die Schleudergebläse haben, so daß mit 1 Teil Frischdampf 2–3 Teile Brüden dampf verdichtet werden und daher für die Strahlgebläse je nach ihrer Leistung die entsprechenden Zahlen der Tafeln 3 und 4 gelten. Ihre Verwendung ist bei einer Verdichtung der Dämpfe um 0,3 at und bei drei- und vierstufigen Verdampfanlagen gegenüber der vierstufigen Verdampfanlage allein jedenfalls zu empfehlen, wenn hochgespannter Kessel dampf zur Verfügung steht, und Frischdampf noch außer dem Abdampf als Heizdampf verwendet werden muß. Es wird dann auch die berechnete Forderung für eine rationelle Wärmewirtschaft erfüllt, daß eine hohe Spannung des Dampfes zunächst zur Arbeitsleistung und erst, wenn er so eine niedrige Spannung erreicht hat, zu Verdampfzwecken dienen soll.

Für eine nutzbringende Verwendung des Dampfstrahlgebläses sind aber einige Bedingungen zu erfüllen, die ich bereits vor 20 Jahren angegeben habe (Zeitschr. d. Vereins d. d. Zuckerind. 1902, 781).

Die Überhitzung des Hochdruckdampfes, sowohl die, die er aus dem Überhitzer mitbringt, als auch die, welche er bei der Expansion im Gebläse erfährt, kann leicht dadurch beseitigt werden, daß das überhitzte Gemisch des Arbeitsdampfes mit dem verdichteten Dampf nicht unmittelbar in die Heizkammer des Verdampfers geführt wird, sondern in das Rohr, durch welches der sehr nasse Abdampf der Betriebsmaschinen zum Verdampfer geleitet wird; es wird damit der doppelte Vorteil der Beseitigung der Überhitzung und der Trocknung des nassen Dampfes erreicht.

Wesentlich und für den Erfolg ausschlaggebend ist, daß nicht ein großes Dampfstrahlgebläse für die ganze Leistung genommen wird, sondern eine Anzahl kleinerer, die zusammen die erforderliche Gesamtleistung haben. Da das Dampfstrahlgebläse nur dann wirtschaftlich arbeiten kann, wenn der volle Dampfdruck in der Düse wirkt, so ist das Drosseln des Kessel dampfes zur Regelung der Dampfzufuhr unzulässig. Werden mehrere kleinere Gebläse angebracht, so ist diese Regelung ohne Beeinträchtigung der Wirkung möglich, indem je nach Bedarf ein oder mehrere Gebläse mit vollem Dampfdruck in Betrieb gesetzt werden.

Zu beachten ist schließlich noch, daß an dem Heizraum eine völlig sicherwirkende Sicherheitseinrichtung anzubringen ist, die eine Überschreitung des für die Heizkammer zulässigen Druckes verhütet, denn es kann leicht vorkommen, daß bei Unaufmerksamkeit in der Bedienung der Gebläse oder der Verdampfanlage der Druck im Raum auf die Höhe des Hochdruckdampfes von 8–10 at und mehr steigt, für den die Verdampfer nicht gebaut sind. Es wären also noch Verhandlungen mit den Überwachungsvereinen nötig, durch die solche Sicherheitseinrichtungen ausfindig gemacht werden.

Zusammenfassung.

Die Wärmepumpe kann für die Wärmewirtschaft der Verdampfanlagen der chemischen und Zuckerindustrie nur dann größere Ersparnisse an Dampf und Kohlen bringen, wenn sie unmittelbar oder auf elektrischem Wege mittelbar durch Wasserkraft betrieben werden kann. Bei durch Dampfmaschinen betriebenen Wärmepumpen sind solche Ersparnisse nicht oder nur in geringerer Höhe zu erzielen, da außer dem verdichteten Brüden dampf auch die großen Mengen Abdampf der Wärmepumpenmaschine in der Verdampfanlage verwertet werden müssen. Der Erfolg ist um so größer, je weniger Abdampf im Verhältnis zu den verdichteten Dämpfen entsteht, d. h. also je höher der Wirkungsgrad des Gebläses ist und mit je geringerem Temperaturgefälle in dem Verdampfer gearbeitet werden kann.

Den üblichen Schleudergebläsen sind als Wärmepumpe die Dampfstrahlgebläse vorzuziehen, die fast den gleichen Wirkungsgrad, aber keine Abkühlungsverluste haben und nur geringe Anschaffungskosten erfordern. [A. 77.]

Beiträge zur Gewichtsanalyse XVII¹⁾.

Von L. W. WINKLER, Budapest.

(Eingeg. 2.5. 1921.)

XXII. Bestimmung des Zinks.

Bei der Bestimmung des Zinks als $\text{Zn}(\text{NH}_4)_2\text{PO}_4$ kann das „Watteverfahren“ vorteilhaft benutzt werden. — Die Ausführungsform ist diese:

Die 100 ccm betragende, 0,10–0,01 g Zn enthaltende, gegen Methylorange eben saure Lösung wird mit 2,0 g Ammoniumchlorid versetzt und in einem Becherglase von 200 ccm bis zu dem Aufkochen erhitzt, dann unter Umschwenken in dünnem Strahle 10 ccm „20 prozentige“ Diammoniumhydrophosphatlösung²⁾ hinzugefügt, wobei anfänglich amorphes, jedoch rasch kristallisch werdendes wasserfreies Zinkammoniumphosphat zur Abscheidung gelangt. Die schwach nach Ammoniak riechende Flüssigkeit bleibt über Nacht

¹⁾ Vgl. Angew. Chem. 30, 31, 32, 33 u. 34, Aufsatzteil.

²⁾ Zu 100 ccm 20 prozentiger Phosphorsäure werden 42 ccm 20 prozentiger Ammoniak gemengt. Die schwach nach Ammoniak riechende Lösung vom spez. Gewichte 1,13 wird an einem kühlen Orte über Nacht stehengelassen, dann durch einen Wattebausch geseiht.