

Mitteilungen
aus dem
Maschinen-Laboratorium
der
Kgl. Techn. Hochschule zu Berlin

V. Heft

Über Kondensation, insbesondere für Dampfturbinen
Versuche über die Wärmeübertragung von Dampf an Kühlwasser.
Kesselfeuerungsversuche mit Teeröl

von

E. Josse

Professor, Geh. Reg.-Rat
Vorsteher des Maschinen-Laboratoriums

Mit 137 Textfiguren



München und Berlin
Druck und Verlag von R. Oldenbourg
1913

VORWORT.

Ein großer Teil der im Maschinenlaboratorium seit Erscheinen des vierten Heftes der »Mitteilungen« ausgeführten Versuche ist bereits in verschiedenen Zeitschriften veröffentlicht worden, z. B.

Versuche an Dampfturbinen:

Bauart Eyer mann	Zeitschr. f. d. ges. Turbinenw. 1908.
Bauart A.E.G. 200 KW	dto. 1910/1911.
Bauart Parsons, Brown Boveri	dto. 1909.
Bauart Kienast	dto. 1911.
Bauart Sächs. Maschinenfabrik vorm. R. Hartmann	dto. 1910.
Versuche an einer Mammutpumpe	Zeitschrift d. Ver. deutsch. Ingen.
Versuche über Dampfströmung	Zeitschrift f. d. ges. Turbinenwesen.
	Zeitschrift d. Ver. deutsch. Ingen.
Versuche mit Strahlapparaten für Kondensationsanlagen	
und zur Kälteerzeugung	Zeitschrift f. d. ges. Kältewesen.
	Jahrb. d. Schiffbautechn. Gesellsch.

Andere Versuche, z. B. an einem Dieselmotor, über Dampfströmung, über Labyrinthdichtungen, zur Bestimmung des Ungleichförmigkeitsgrades, an neuartigen Ventilen, Stopfbüchsen und Gelenkkompensatoren etc., sind teils durchgeführt, teils noch in Arbeit und werden in absehbarer Zeit veröffentlicht.

Mit diesem fünften Heft der Mitteilungen werden einige weitere Versuche, die in den letzten Jahren durchgeführt worden sind, und daraus sich ergebende Konstruktionsgrundlagen weiteren Kreisen zugänglich gemacht.

Charlottenburg, im Juni 1913.

Josse.

INHALT.

	Seite
Über Kondensation, insbesondere für Dampfturbinen	1
Die Aufgaben der Kondensation	2
Wärmetechnische Grundlagen beim Kondensationsvorgange	6
Luft- und Kondensatpumpen	18
Versuche an der 300 KW-Parsons-Turbinenanlage des Maschinenbau-Laboratoriums Charlottenburg. (Kolbenpumpe.)	25
Versuche an der 200 KW-AEG-Turbinenanlage des Maschinenbau-Laboratoriums	31
Weitere Versuche	35
Oberflächenkondensationsanlagen bis zum Jahre 1910	36
Neuere Kondensationsanlagen mit Luftabsaugevorrichtungen durch Strahlwirkung	39
Wirtschaftlichkeit der Kondensationsanlagen	55
Versuche über die Wärmeübertragung von Dampf an Kühlwasser	57
Versuchsordnung	59
Abhängigkeit des Temperaturexponenten von Temperaturdifferenz und Wassergeschwindigkeit	70
Ergebnisse der Versuche. Vergleich mit den Versuchen von Orrock	79
Kesselfeuerungsversuche mit Teeröl	84
Versuchseinrichtung	84
Zusammenfassung der Ergebnisse	90
Eigenschaften des verwendeten Teeröls	90
Allgemeine Beurteilung der Brennersysteme	91
Wirtschaftliche Beurteilung der Ölfeuerung	92

Über Kondensation, insbesondere für Dampfturbinen.

Inhalt: Die Aufgaben der Kondensation. Einspritz- und Oberflächenkondensation. Einfluß des Vakuums. Wärmetechnische Grundlagen beim Kondensationsvorgange. Spezifische Kühlmwassermenge. Wärmeübertragung durch eine Wandung. Versuche über die Wärmedurchgangszahlen. Abhängigkeit der übertragenen Wärmemenge von der Temperaturdifferenz Dampf — Wasser. Einfluß der Luft. Versuche über die Wärmeübergangszahlen Luft — Rohrwand. Notwendigkeit der Luftabkühlung. Luft- und Kondensatpumpen. Raschlaufende Naßluftpumpe. Abhängigkeit des erreichbaren Vakuums von der Leistungsfähigkeit der Luftabsaugvorrichtung. Versuche an der 300 KW-Parsons-Turbinenanlage und an der 200 KW-AEG-Turbinenanlage des Maschinenbau-Laboratoriums. Beispiele von Oberflächenkondensationsanlagen bis zum Jahre 1910. Luftabsaugvorrichtungen durch Strahlwirkung. Strahlluftpumpen. Wasserstrahl. Dampfstrahl. Kombiniertes Wasser- und Dampfstrahlapparat. Beispiele ausgeführter Kondensationsanlagen ohne Luftpumpe. Versuche an Anlagen dieser Bauart. Wirtschaftlichkeit der Kondensationsanlagen.

Die günstige thermodynamische Ausnutzung geringer Dampfspannungen durch die Niederdruckstufe der Dampfturbinen hatte zur Folge, daß an die von Kondensationsanlagen der Dampfturbinen erzeugten Luftleeren immer höhere Anforderungen gestellt wurden. Während man bei Dampfmaschinen eine Luftleere von 80 bis 85 v. H. für ausreichend hielt und erst neuerdings auch hier höhere Luftleeren mit Erfolg verwendet (Gleichstrommaschine), fordert man heute bei Dampfturbinen eine Luftleere bis hinauf zu 97 v. H.

Da die vorzugsweise mit Oberflächenkondensation ausgestatteten Dampfturbinen ihrer Natur nach in erster Linie Großkraftmaschinen sind, mithin große stündliche Dampfmengen verarbeiten, so ergeben sich Kondensationsanlagen, deren Raumbedarf im allgemeinen wesentlich über den der eigentlichen Turbinen hinausgeht und deren Anschaffungskosten verhältnismäßig groß sind.

Es war daher von hervorragendem technischem und wirtschaftlichen Wert, die dem Entwurf der Oberflächenkondensationen zugrunde zu legenden technischen Fragen durch Versuche zu klären und zu erörtern, wie weit man die verlangten hohen Luftleeren mit geringerem Aufwand an Raum und Kosten zu befriedigen vermag.

Zu diesem Zweck habe ich seit einigen Jahren an dem Bau von Oberflächenkondensatoren und von Luftabsaugungseinrichtungen mitgewirkt und in Gemeinschaft mit Herrn Dr.-Ing. Gensecke sowie Herrn Dr.-Ing. Hoefler eine Reihe von Versuchen angestellt, welche zur wissenschaftlichen Klärung der in Betracht kommenden Konstruktionsgrundlagen geeignet sind.

Über diese Versuche, die sich daraus ergebenden Berechnungsgrundlagen und Konstruktionen soll nachstehend berichtet werden.

1. Die Aufgaben der Kondensation.

Die Kondensationsanlagen der Dampfkraftmaschinen (Dampfmaschinen und Dampfturbinen) haben den Zweck, den aus den Maschinen austretenden entspannten Arbeitsdampf in einem an das Auspuffrohr angeschlossenen Kondensationsraum niederzuschlagen, um dort eine Luftleere zu erzielen, so daß das in der Maschine ausnutzbare Druckgefälle um die erreichte Luftleere vergrößert wird.

Man unterscheidet bekanntlich zwei im Wesen verschiedene Kondensationsarten: die Einspritz- und die Oberflächenkondensation. Bei der Einspritzkondensation wird das zur Wärmeabfuhr nötige Kühlwasser in den etwa durch Erweiterung des Auspuffrohres gebildeten Kondensationsraum eingespritzt, wobei der Dampf durch Berührung mit dem Wasser niedergeschlagen wird. Bei Oberflächenkondensationen kommt der Dampf mit dem Kühlwasser nicht unmittelbar in Berührung, sondern die Dampfwärme wird durch Oberflächen hindurch an das Kühlwasser übertragen, Kondensat und Kühlwasser bleiben also hier stets getrennt.

Während bei ortfesten Anlagen von Kolbendampfmaschinen fast ausschließlich die einfachere und billigere Einspritzkondensation ausgeführt wird, sehen wir bei Dampfturbinen in den meisten Fällen der Oberflächenkondensation den Vorzug gegeben. Für Schiffe kommt überhaupt nur die Oberflächenkondensation in Betracht, ganz gleichgültig, ob Dampfmaschinen oder Dampfturbinen eingebaut werden, weil man genötigt ist, das den Oberflächenkondensatoren entnommene reine Wasser den Kesseln wieder zuzuführen.

Die Gründe, warum man bei ortfesten Dampfturbinenanlagen, wo das reine Kondensat nicht unbedingt zurückgefördert zu werden braucht, in der großen Mehrzahl ebenfalls der Oberflächenkondensation vor der einfacheren und billigeren Einspritzkondensation den Vorzug gibt, sind in gewissen Vorteilen der ersteren für Dampfturbinenbetrieb zu suchen. Diese Vorteile sind folgende:

1. Die Oberflächenkondensatoren erzielen die für Dampfturbinen nötige hohe Luftleere leichter als die Einspritzkondensatoren;
2. das Kondensat ist ölfrei und daher mit Vorteil zur Kesselspeisung geeignet;
3. die Nachteile, die durch Krustenbildung an den Turbinenschaufeln auftreten, falls bei Verwendung von Wasserreinigern Soda im Überschuß vorhanden ist, fallen fort;
4. die Einspritzkondensatoren bieten für Turbinen eine gewisse Gefahr, da die Möglichkeit besteht, daß bei Unachtsamkeit in der Bedienung oder durch irgendwelche Zufälligkeiten das Kühlwasser bis in die Turbine emporsteigt und Schaufelbrüche hervorruft. Allerdings hat man die Möglichkeit, Einrichtungen zu treffen, welche selbsttätig das Ansteigen des Einspritzwassers bis zur Turbine unmöglich machen.

Bei den großen Einheiten — 12 000 bis 25 000 PS, bei Schiffen noch mehr —, die man heute im Dampfturbinenbau ausführt, ist es selbstverständlich, daß die zugehörigen, für hohe Luftleere zu bauenden Oberflächenkondensatoren bedeutenden Raum erfordern; der Raumbedarf dieser Hilfseinrichtungen ist in der Regel wesentlich größer als derjenige der Turbinen, und insbesondere sind die Herstellungskosten dieser Kondensatoren sehr erheblich. Beispielsweise kostet heute noch die Oberflächenkondensationseinrichtung für Dampfturbinen etwa 25 bis 40 v. H. der Dampfturbinenanlage. Für Schiffe spielt außer dem Raumbedarf auch noch das bedeutende Metall- und Wassergewicht dieser Einrichtungen eine große Rolle.

Es ist deshalb für den Turbinenbau von hervorragender technischer und wirtschaftlicher Bedeutung, die Oberflächenkondensatoren so einzurichten, daß man mit verhältnismäßig kleinen Oberflächen, d. h. mit billigen und leichten Einrichtungen, die Forderungen des Dampfturbinenbaues erfüllt.

Die nachstehend erörterten Versuche, welche den Zweck haben, zur Klärung dieser Fragen beizutragen, sind in dem von mir geleiteten Maschinenbaulaboratorium, auf Schiffen und an ortfesten Anlagen angestellt worden; insbesondere haben wir auch die physikalischen Vorgänge, welche die Grundlagen für den rationellen Bau von Oberflächenkondensatoren bilden, erforscht; auf Grund dieser Studien sind in der Folge unter meiner Mitwirkung Kondensationseinrichtungen von wesentlich höherer Leistungsfähigkeit entworfen worden und in Betrieb gekommen, über die ebenfalls berichtet wird.

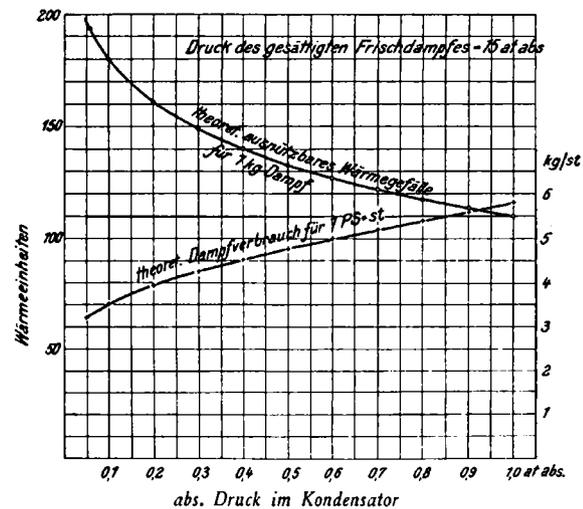


Fig. 1. Einfluß des Vakuums auf die theoretische Wärmeausnutzung.

Bevor ich auf dieses eigentliche Gebiet übergehe, möchte ich zunächst mit einigen Worten die früheren Anordnungen und die erst durch die Dampfturbinen hervorgerufenen neuen Ansprüche an die Höhe des zu erzielenden Vakuums kennzeichnen.

Der Einfluß des Vakuums auf die theoretische Wärmeausnutzung bei den Dampfkraftmaschinen wird durch Schaubild Fig. 1 veranschaulicht. Als Abszissen sind die absoluten Drücke im Kondensator, als Ordinaten die bei den verschiedenen Kondensatorspannungen von einer Dampfspannung von 15 Atm. abs. herab theoretisch ausnutzbaren Wärmegefälle aufgezeichnet. Man sieht, wie das ausnutzbare Wärmegefälle z. B. zwischen 0,3 und 0,05 Atm. abs. Gegendruck erheblich (um rd. 30 v. H.) anwächst; oder, wenn man die Verhältnisse auf den theoretischen Dampfverbrauch für 1 PS/Std. überträgt, so ergibt sich mit Abnahme des Gegendruckes zunächst eine fast genau lineare Abnahme, bei dem niedrigen Gegendruck zwischen 0,3 und 0,05 Atm. abs. aber ein merklich rascherer Abfall des spezifischen Dampfverbrauches.

Diese theoretischen Verhältnisse gelten zwar ebenso für die Kolbendampfmaschine wie für die Dampfturbine; in Wirklichkeit vermag aber die Dampfturbine das hohe Vakuum weit vollkommener auszunutzen als die Kolbendampfmaschine.

Da bei dem geringen Gegendruck in der Nähe von 0,2 Atm. abs. abwärts das spezifische Volumen des Dampfes ganz gewaltig wächst, reichen für die Aufnahme dieser Volumina die normalen Steuerungsquerschnitte der Kolbenmaschine, die doch nur bis zu einer gewissen Größe ausgeführt werden können, im allgemeinen nicht aus (bei Gleichstrommaschinen liegen die Verhältnisse günstiger). Infolge der durch Steuerung und Rohrleitung veranlaßten unvermeidlichen Strömungswiderstände kommt ein im Kon-

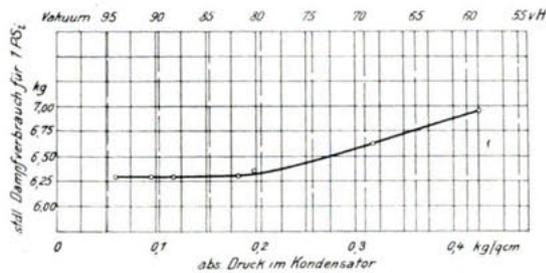


Fig. 2.
Dreifach-Verbundmaschine (gesättigter Dampf).

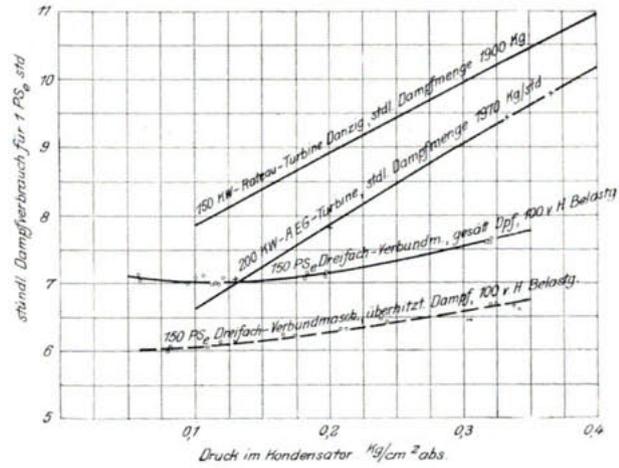


Fig. 3.
Abnahme des Dampfverbrauches mit dem Kondensatordruck bei Dampfturbinen im Vergleich zur Kolbenmaschine.

densator erzeugter sehr geringer Gegendruck von 0,05 Atm. in der gewöhnlichen Kolbenmaschine selbst überhaupt nicht zur Wirkung. Dies ergibt sich deutlich aus Versuchen, welche Verfasser vor einigen Jahren an einer 200-pferdigen Dreifach-Verbundmaschine im Maschinen-

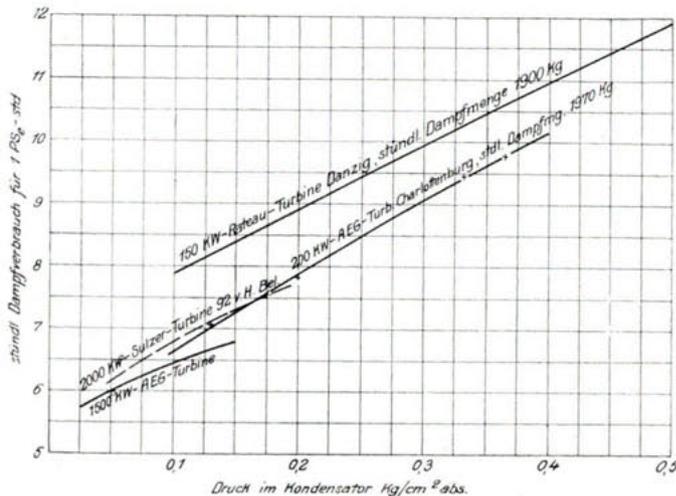


Fig. 4. Abnahme des Dampfverbrauches mit dem Kondensatordruck der Dampfturbinen.

baulaboratorium der Technischen Hochschule Charlottenburg ausgeführt hat.¹⁾

Man verfolge in Fig. 2 die Abnahme des Dampfverbrauches dieser Kolbenmaschine mit dem Gegendruck bis 0,2 Atm. abs. Von da ab konnte bei der Versuchsmaschine eine weitere Verminderung des Dampfverbrauches durch Erhöhung des Vakuums nicht mehr erzielt werden.

Die Dampfturbinen verhalten sich wesentlich anders. Die Bauart der Dampfturbine eignet sich ganz ausgezeichnet zur Aufnahme gewaltiger Dampfvolumina, und man ist daher hier imstande, die im Kondensator

erzeugte hohe Luftleere in der Turbine selbst zur Wirkung zu bringen. Dies hat zur Folge, daß bei den Dampfturbinen eine stetige Abnahme des Dampfverbrauches, und zwar

¹⁾ Josse, Mitteilungen aus dem Maschinenbaulaboratorium der Königlich Technischen Hochschule Charlottenburg, Heft 4 (R. Oldenbourg, München und Berlin).