

Mit dem Carnotschen Kreisprozeß verglichen würde sich ein idealer thermischer Wirkungsgrad

$$\frac{T_1 - T_2}{T_1} = \frac{439,8 - 373}{439,8} = 0,152,$$

somit ein indizierter Wirkungsgrad von

$$\frac{0,108}{0,152} = 0,71$$

ergeben.

Eine Einfachexpansionsmaschine ohne Kondensation leistet somit um durchschnittlich 30 Prozent weniger als eine thermodynamisch vollkommene, zwischen denselben Temperaturgrenzen arbeitende ideale Maschine, deren Ausströmdampf unter atmosphärischem Drucke kondensiert und in den Kessel ohne Wärmeverlust zurückgespeist wird.

Die früher erwähnten, von Willans mit Schnellläufern seiner Spezialtype durchgeführten interessanten Versuche umfaßten Versuche sowohl mit Eincylinder- als auch mit Compoundmaschinen ohne Kondensation\*).

Mit einer kleinen Eincylindermaschine wurde bei 400 minutlichen Umläufen das günstigste Resultat mit 11,6 kg Dampf pro PS<sub>i</sub>-Stunde bei einer mittleren Admissionsspannung von 7,2 kg/qcm absolut und einem Expansionsverhältnis von ungefähr 4½ (ca. 22 Prozent Füllung) erreicht. Höhere Effekte wurden mit Compoundmaschinen bei derselben Umlaufzahl erzielt. Bei einer Kesselspannung von im Mittel 7 kg/qcm Überdruck benötigte die Maschine 10,3 kg Dampf pro PS<sub>i</sub>-Stunde. Bei etwas über 9 kg/qcm Kesseldruck sank der Dampfverbrauch auf 9,2 kg, bei 11 kg/qcm auf 8,5 kg. Diese gewiß sehr bemerkenswerten Resultate wurden noch bei einigen Versuchen mit Dreifachexpansion übertroffen; bei 11,7 kg/qcm Kesselüberdruck betrug der Dampfkonsum nur 8,2 kg pro PS<sub>i</sub>-Stunde als Mittelwert von drei unabhängigen, sorgfältig durchgeführten Versuchen, sämtlich natürlich ohne Kondensation.

Für dieses letzte Resultat berechnet sich nach der Gleichung für  $W$  das Maximum an Arbeit, welches nach dem idealen Prozesse von 1 kg Dampf geleistet werden kann, durch das Wärmeäquivalent  $W = 97,7$  W.E. Die Maschine lieferte hingegen pro 1 kg Dampf eine Arbeit äquivalent zu  $\frac{634}{8,2} = 77,3$  W.E. Der indizierte Wirkungsgrad beträgt daher 0,79. Alle übrigen bekannt gewordenen Versuche mit niedrigeren Spannungen haben ähnliche Resultate wie die hier mitgeteilten ergeben.

**98. Versuchsergebnisse. Maschinen mit Kondensation.** Hinsichtlich des Dampfverbrauches der Kondensationsmaschinen liegt eine

\*) Siehe *Minutes of Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, Vol. XCIII und XCVI.

Reihe vorzüglich durchgeführter Versuche vor, welche auch zum Teil veröffentlicht worden sind. Mit Ausnahme der bereits an früherer Stelle für Kondensationsmaschinen namhaft gemachten Verbrauchsziffern sollen hier nur die Resultate einiger der interessantesten Versuche hervorgehoben werden.

Zunächst seien die Versuche Mair-Rumleys\*) mit einer langsam gehenden Eincylindermaschine mit Dampfmantel erwähnt; die Maschine leistete bei 20 Umdrehungen pro Minute rund 120 PS und verbrauchte bei nur 3 Atmosphären Kesselspannung Überdruck 9,8 bis 9,5 kg Dampf pro PS,-Stunde. Diese Zahlen ergeben einen thermischen Wirkungsgrad von 0,10.

Versuche von Hill mit Corlißmaschinen höherer Kolbengeschwindigkeit ergaben bei 7 Atm. Kesselspannungüberdruck einen Dampfverbrauch von 8,7 bis 9,2 kg. Willans Versuche mit einer kleinen schnellaufenden Maschine seines Systems ergaben bei ca. 7 Atm. Kesselüberdruck einen Konsum von 9,8 kg Dampf pro PS,-Stunde. Die Maschinen arbeiteten sämtlich mit Dampfmänteln.

Prof. Linde untersuchte eine Eincylindersulzermaschine von 300 PS; dieselbe benötigte bei etwas über 7 kg/qcm Kesseldruck absolut 8,5 kg Dampf pro PS,-Stunde. Der indizierte Wirkungsgrad resultiert daraus mit 0,45, der thermische Wirkungsgrad mit 0,12.

Bezüglich des Dampfverbrauches von Compoundmaschinen seien wieder in erster Linie die Versuche Mair-Rumleys mit drei Maschinen von je ca. 130 PS namhaft gemacht; die Maschinen arbeiteten mit Dampfmänteln bei einer Kesselspannung von im Mittel 4,2 kg/qcm Überdruck und 25 Touren pro Minute; der Dampfverbrauch wurde mit 6,6 bis 6,9 kg pro PS,-Stunde ermittelt. Das Gesamtexpansionsverhältnis war bei diesen Versuchen ungefähr 14; bei dieser hohen Expansion und geringen Umlaufzahl erwies sich die Dampfheizung als äußerst wirksam. Aus vorstehenden Zahlen resultiert ein thermischer Wirkungsgrad der untersuchten Maschinen von 0,14 bis 0,15, welcher in Berücksichtigung der niedrigen Kesselspannung als sehr günstig bezeichnet werden muß.

Um diese und andere Versuchsergebnisse von Kondensationsmaschinen mit der theoretisch erreichbaren Leistung vergleichen zu können, nehmen wir als untere Temperaturgrenze jene Temperatur an, bei welcher die Kondensation gewöhnlich erfolgt, d. i. 35° bis 40°, also im Mittel 38° C. Die Werte von  $W$  nach Gleichung (7) oder (8) § 54, unter Zugrundelegung dieser unteren Temperatur für verschiedene Werte der oberen

\*) Beschrieben in zwei Arbeiten (J. G. Mair) in *Minutes of Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, Vol. I, XX und I, XXIX.

Temperaturgrenze beziehungsweise Eintrittsspannung gerechnet, sind in Tabelle XI § 99 zusammengestellt und können daher zum Vergleiche der wirklichen mit der idealen Leistung einer Kondensationsmaschine direkt benutzt werden.

Ziehen wir das beste der vorstehenden Versuchsergebnisse in Betracht (6,6 bis 6,9 kg Dampf bei 4,2 kg/qcm Überdruck), dann ergibt sich für die absolute Kesselspannung von 5,2 kg/qcm

$$W = 151;$$

die pro kg Dampf wirklich geleistete Arbeit ist hingegen in Wärmeinheiten ausgedrückt

$$\frac{634}{6,6} = 96 \text{ W.-E.}$$

oder

$$0,63 \text{ W.}$$

Dieser Prozentsatz der theoretischen Leistung ist wesentlich geringer wie jener guter Maschinen ohne Kondensation; es ist dies eine bei allen Kondensationsmaschinen zu beobachtende Eigentümlichkeit; der indizierte Wirkungsgrad erreicht selten 0,60, während derselbe bei Maschinen ohne Kondensation zwischen 0,74 und 0,80 liegt; diese Tatsache ist zum Teil dadurch begründet, daß bei Kondensationsmaschinen die tiefer liegende untere Temperaturgrenze nicht genügend ausgenützt werden kann, weil selbst eine Annäherung an die vollständige Expansion mit gewissen Schwierigkeiten verbunden ist. Auch bringt das größere Temperaturgefälle der Kondensationsmaschine eine erhöhte ungünstige Wirkung der Cylinderwandung hervor.

Als ein weiteres Beispiel diene ein von Prof. Unwin mit einer Worthingtonpumpmaschine, welche als direkt wirkende Compounddampf-pumpe mit Dampfmantel und ohne Schwungrad ausgeführt ist, ausgeführter Versuch\*). Die Maschine machte 17 Doppelhübe pro Minute; die Kesselspannung betrug bei zwei getrennt vorgenommenen Versuchen 6 beziehungsweise 5 Atmosphären absolut; die indizierte Leistung 292 und 252 PS. Der totale Dampfverbrauch ergab sich mit 7,8 bzw. 7,9 kg pro PS<sub>i</sub>-Stunde. Daraus bestimmt sich  $W$  mit 157 und 151; der indizierte Wirkungsgrad mit 0,51 bzw. 0,53, der thermische Wirkungsgrad mit 0,13.

Versuche mit einer Compoundpumpmaschine von 250 PS der Boston Main Drainage Works ergaben bei 13 Umdrehungen pro Minute, einer absoluten Kesselspannung von 7,8 kg/qcm und Dampfmantelheizung einen Dampfverbrauch von 6,2 bis 6,3 kg pro PS<sub>i</sub>-Stunde. Daraus resultiert pro

\*) *Engineering*, Dezember 1888.

kg Dampf eine Arbeit äquivalent 100 Wärmeeinheiten; ein indizierter Wirkungsgrad von 0,60 und ein thermischer Wirkungsgrad von 0,16\*).

Bezüglich des Dampfverbrauches der Dreifachexpansionsmaschine sei zunächst auf eine Reihe von Versuchen an großen, modern konstruierten Schiffsmaschinen hingewiesen, welche von einer Untersuchungskommission der Institution of Mechanical Engineers unter Leitung Professor Kennedys durchgeführt wurden\*\*). Die Leistungen der untersuchten Maschinen waren nicht in allen Fällen von gleicher Güte; das beste Resultat der bis zum Jahre 1892 durchgeführten Versuche ergab die Triplexmaschine des Dampfers „Jona“ von 650 PS, deren Hochdruckcylinder mit Dampf geheizt wurde. Der Kesseldruck betrug 12,2 kg/qcm absolut; der Dampfverbrauch 5,95 kg pro PS<sub>i</sub>-Stunde. Die pro kg Dampf geleistete Arbeit war somit 106,6 Wärmeeinheiten äquivalent; der indizierte Wirkungsgrad betrug 0,58, der thermische Wirkungsgrad 0,17.

Prof. Busley gibt in seinem Werke „Die Schiffsmaschine“, 3. Aufl., S. 444, 461 und 557 Zusammenstellungen über die mit Schiffsmaschinen der deutschen Kriegs- und Handelsmarine anlässlich von Probefahrten erzielten Verbrauchsziffern, welche im allgemeinen Resultate ergaben, die mit jenen der Versuche der Institution of Mechanical Engineers übereinstimmen.

Prof. Osborne Reynolds veröffentlichte einen ausführlichen Bericht über Versuche, welche mit der Dreifachexpansionsmaschine des Whitworth Engineering Laboratoriums in Owens College durchgeführt wurden und einige bemerkenswerte Resultate ergaben\*\*\*).

Bei einer absoluten Kesselspannung von rund 14 Atm., einer Leistung von 72 PS<sub>i</sub>, bei 300 Umdrehungen per Minute, mit Dampf geheizten Cylindern, ergab sich ein Dampfverbrauch von 5,65 kg per PS<sub>i</sub>-Stunde. Daraus ergibt sich die Äquivalenz der pro kg Dampf geleisteten Arbeit mit 112 Wärmeeinheiten; der indizierte Wirkungsgrad mit 0,59, der thermische Wirkungsgrad mit 0,18. Diese Resultate sind in Anbetracht der verhältnismäßig geringen Leistung der Maschine außerordentlich günstig.

Die Versuche von Willans, auf deren Wichtigkeit bereits wiederholt hingewiesen wurde, ergaben nahezu gleich günstige Resultate.

Bei verschiedenen mit Triplexkondensationsmaschinen seines Systems abgeführten Versuchen blieb der stündliche Dampfverbrauch pro PS<sub>i</sub> unter

\*) Boston Soc. of Civil Engineers 1885, sowie Peabodys *Thermodynamics of the Steam-Engine*, S. 293.

\*\*\*) *Proceedings of the Inst. of Mech. Engineers* 1889. Über die Versuche mit den Maschinen der „Jona“ wurde April 1891 berichtet. Der Bericht Mai 1892 enthält eine Zusammenstellung der Resultate dieser und anderer Versuche.

\*\*\*\*) *Minutes of Proc. of the Inst. of Civil-Engineers*, Dez. 1889.

5,8 kg. Bei einem dieser Versuche, bei einer absoluten Spannung von 12,6 kg/qcm vor Eintritt in den ersten Cylinder (die etwas höhere Kesselspannung ist in dem Berichte der Versuche nicht angegeben), einer Umlaufszahl von 375 pro Minute, ergab sich der geringste Dampfverbrauch von 5,66 kg; die Cylinder waren nicht geheizt. Das Wärmeäquivalent der pro kg Dampf geleisteten Arbeit beträgt  $\frac{634}{5,66} = 112$  Wärmeinheiten; nimmt man obige Spannung von 12,6 kg/qcm als obere Grenze für die Berechnung von  $W$ , dann resultiert ein indizierter Wirkungsgrad 0,60 und ein thermischer Wirkungsgrad 0,18.

Die Versuche Willans mit seinen Zweicylinder-Compoundkondensationsmaschinen ergaben selbst bei den höchsten Umlaufszahlen eine pro kg Dampf geleistete Arbeit von 0,5 bis 0,55  $W$ . Der geringste erzielte Dampfverbrauch betrug 6,35 kg pro PS<sub>i</sub>-Stunde, bei einer Dampfspannung von ungefähr 12 kg/qcm absolut vor Eintritt in die Maschine. Der indizierte Wirkungsgrad betrug daher 0,54.

Von Prof. Schröter (München) wurden mehrere Versuche mit Dreifachexpansionsmaschinen veröffentlicht, welche, insofern sie die Anwendung überhitzten Dampfes betreffen, bereits früher (§ 91) besprochen worden sind; hier seien nur die auf die Verwendung gesättigten Dampfes bezugnehmenden Resultate herausgezogen.

Bei den Versuchen mit einer 200 PS-Maschine wurde bei einer absoluten Dampfspannung von 11,7 kg/qcm, geheizten Cylindern, ein Dampfverbrauch von 5,4 beziehungsweise 5,6 kg per PS<sub>i</sub>-Stunde ermittelt (im zweiten Werte ist das in der Rohrleitung kondensierte Wasser inbegriffen). Die pro kg Dampf geleistete Arbeit ist daher 117 Wärmeinheiten äquivalent; ferner ist  $W = 180$  Wärmeinheiten, somit der indizierte Wirkungsgrad 0,65 und der thermische Wirkungsgrad rund 0,19.

Die Versuche mit einer Triplexsulzermaschine von 600 PS ergaben bei einer absoluten Dampfspannung von 10,9 kg/qcm einen stündlichen Dampfverbrauch von 5,63 kg pro PS<sub>i</sub>.

Zweicylindercompoundmaschinen derselben Type ergaben als Mittelwert einer größeren Reihe von Versuchen 6,37 kg Dampf pro PS<sub>i</sub>-Stunde bei absoluten Spannungen von 6,8 bis 7 kg/qcm.

Die bereits früher benutzten Versuche Schröters mit der Dreifachexpansionsmaschine der Kammgarnspinnerei in Augsburg<sup>\*)</sup> ergaben bei Verwendung gesättigten Dampfes von 5,9 kg/qcm mittleren Admissionsspannungsüberdruck, einer mittleren Leistung von 1070 PS, einen effektiven Speisewasserverbrauch von 6,10 kg pro PS<sub>i</sub>-Stunde. In Anbetracht der nie-

<sup>\*)</sup> Zeitschrift des Vereins deutscher Ingenieure, Jhrg. 1896.

drigen Dampfspannung ist auch das Versuchsergebnis verhältnismäßig ungünstig.

Prof. Stodola (Zürich) ermittelte bei den Versuchen mit der dreistufigen Dampfmaschine des Wasserwerkes der Stadt St. Gallen\*) bei einer mittleren Leistung von 160 PS<sub>e</sub>, einer mittleren Dampfspannung im Kessel von 10,45 kg/qcm Überdruck, einen mittleren Speisewasserverbrauch (abzüglich Leitung) von 5,36 kg per PS<sub>i</sub>-Stunde. Aus diesen Ergebnissen resultiert  $W = 179$  Wärmeeinheiten, die pro kg Dampf geleistete Arbeit in Wärmeeinheiten 118, somit ein indizierter Wirkungsgrad von 0,66 und ein thermischer Wirkungsgrad von 0,178.

Unter den in neuester Zeit durchgeführten Versuchen sei die Untersuchung einer Dreicylinderdampfmaschine der Norddeutschen Portlandzementfabrik zu Misburg in Hannover von H. Lorenz hervorgehoben\*\*).

Die Maschine wurde für eine Normalleistung von 700 PS<sub>i</sub> beziehungsweise Maximalleistung von 900 PS<sub>i</sub> gebaut; wegen mangelnder Belastung konnte dieselbe jedoch während der zweitägigen Versuchsdauer nur mit 600 PS<sub>i</sub> mittlerer Leistung auf ihren Dampfverbrauch untersucht werden. Die Versuche erfolgten in zwei Reihen und zwar mit Mantelheizung und ohne Mantelheizung. Bei einer mittleren Tourenzahl von 74,6 pro Minute und einem mittleren Kesselspannungsüberdruck von 11,95 beziehungsweise 11,98 kg/qcm, betrug der Dampfverbrauch pro PS<sub>i</sub>-Stunde

mit Mantelheizung 5,45 kg  
und ohne Mantelheizung 5,67 „

Der auffallend geringe Unterschied des Gesamtdampfverbrauches von nur ca. 0,2 kg pro PS<sub>i</sub>-Stunde des Versuches mit Heizung der Mäntel und Zwischenkammern gegenüber den Versuchen ohne Heizung war durch die Art der Heizung und Entwässerung bedingt.

Nach der allgemeinen Gleichung (7) oder (8) § 54 ergibt sich für vorstehende Beobachtungswerte  $W = 183,5$  Wärmeeinheiten. Ferner das Wärmeäquivalent der pro kg Dampf geleisteten Arbeit mit  $\frac{634}{5,45} = 116,3$  beziehungsweise  $\frac{634}{5,67} = 111,8$  Wärmeeinheiten.

Daraus ergibt sich für die Versuche mit Mantelheizung der indizierte Wirkungsgrad = 0,64, der thermische Wirkungsgrad = 0,186; für die Versuche ohne Heizung der indizierte Wirkungsgrad = 0,62 und der thermische Wirkungsgrad = 0,179.

In Tabelle X sind die wichtigsten Resultate der im vorstehenden besprochenen Versuche mit Kondensationsmaschinen und gesättigtem Dampf

\*) Zeitschrift des Vereins deutscher Ingenieure, Jhrg. 1898.

\*\*) Ebenda, Jhrg. 1901.

zusammengestellt. Die Ergebnisse der Versuche mit überhitztem Dampf wurden bereits in § 91 und 92 angeführt.

Tabelle X. Versuchsergebnisse mit Kondensationsmaschinen.

Art der Maschine	Kesseldruck in kg/qcm absolut	Dampf- verbrauch pro PS <sub>1</sub> -Std. in kg	Indizierter Wirkungs- grad	Thermischer Wirkungs- grad
Langsamgehende Eincylinder- balanciermaschine (Mair- Rumley) .....	4,0	9,65	0,46	0,10
Eincylindercorlißmaschine (Hill) .....	8,0	8,95	0,44	0,12
Eincylindersulzermaschine (Linde) .....	7,0	8,47	0,45	0,12
Zweicylindercompoundbalan- ciermaschine (Mair-Rumley)	5,2	6,75	0,63	0,15
Zweicylindercompound- Worthingtonpumpmaschine	5,0 6,0	7,9 7,8	0,53 0,51	0,13
Zweicylindercompoundpump- maschine (Boston Main Drainage Works) .....	7,8	6,25	0,60	0,16
Zweicylindercompoundmasch., einfach wirkend, Schnell- läufer (Willans) .....	12,2	6,35	0,54	0,16
Triplexschiffsmaschine „Jona“ (Kennedy) .....	12,2	5,95	0,58	0,17
Triplexversuchsmaschine (Reynolds) .....	14,0	5,65	0,59	0,18
Triplexmaschine, einf. wirkend, Schnellläufer (Willans) .....	12,6	5,66	0,60	0,18
Triplexsulzermaschine (Schröter) .....	11,7	5,5	0,65	0,19
Triplexpumpmaschine (Stodola)	11,45	5,36	0,66	0,178
Triplexbetriebsmaschine (Lorenz) .....	13,0	5,45	0,64	0,186

Die vorstehenden Versuche seien schließlich noch ergänzt durch einen interessanten Versuch an einer langsamgehenden Zweicylindercompoundmaschine mit Kondensation, welche mit einer für derlei Maschinen ausnahmsweise hohen Admissionsdampfspannung von 10 kg/qcm absolut arbeitete\*). Beide Cylinder sowie der Receiver wurden durch Dampf von der Admissionsspannung geheizt; dieser Umstand, sowie die geringe Tourenzahl der Maschine (34 pro Minute) bewirkten, daß der Dampf trotz der geringen Füllung des Hochdruckcylinders (ungefähr  $\frac{1}{6}$ ) während der Expansion verhältnismäßig trocken blieb. Der Feuchtigkeitsgehalt des Dampfes war mit Schluß der Füllung im Hochdruckcylinder ca 25%; hingegen mit

\*) Chief Engineers Report of the Engine, Boiler and Employer's Liability Insurance Co., 1895.

Schluß der Expansion nur etwa 11%. Im Niederdruckcylinder betrug der Feuchtigkeitsgehalt 22% mit Schluß des Eintrittes und 12% bei Beginn der Ausströmung. Die beistehenden Figuren 47 und 48 sind diesem Versuche ent-

nommene Indikator-diagramme des Hoch- und Niederdruckcylinders; die Spannungen sind den Originaldiagrammen entsprechend in Pfund englisch pro Quadratzoll eingetragen.

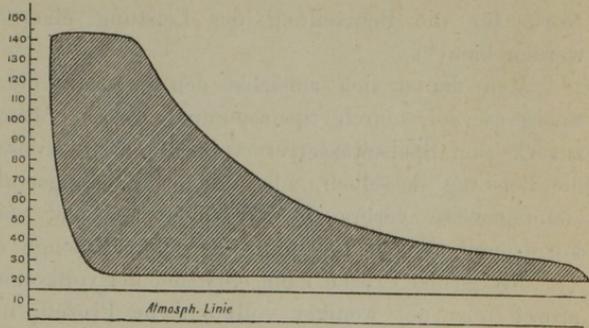


Fig. 47.

Nachdem das Niederdruckzylinderhubvolumen viermal so

groß wie jenes des Hochdruckzylinders angenommen wurde, war das Gesamtexpansionsverhältnis ein für Compoundmaschinen außergewöhnlich großes. Die Maschine entwickelte eine Leistung von 220 PS<sub>i</sub> bei einem Dampfverbrauche von 5,72 kg pro PS<sub>i</sub>-Stunde (gemessen aus der Summe des Kondensatorab-

wassers und des Mantelwassers). Der indizierte Wirkungsgrad berechnet sich daraus mit 0,62, der thermische Wirkungsgrad mit 0,17. Von dem Gesamtdampfverbrauche konsumierte die Mantelheizung ungefähr 8%.

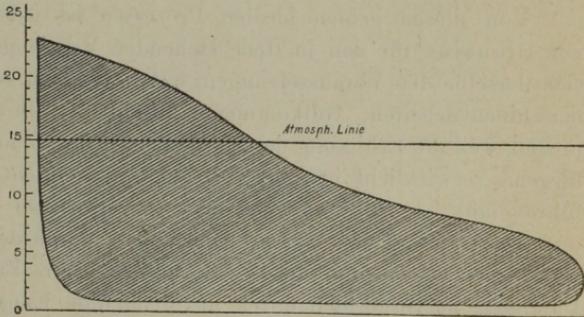


Fig. 48.

Die bei diesem Versuche erzielten Re-

sultate sind nahezu gleichwertig wie jene der besten Dreifachexpansionsmaschinen und zeigen, daß unter besonders günstigen Verhältnissen eine Zweicylindermaschine praktisch ebenso vorteilhaft zu arbeiten vermag, als die infolge des dritten Cylinders kompliziertere Triplexmaschine. Insofern bietet der in Rede stehende Versuch besonderes Interesse.

**99. Normen für die Beurteilung der Versuchsergebnisse.** Bei Besprechung der im vorhergehenden angeführten Versuchsergebnisse wurde