

hältnismäßig kleinen Menge Manteldampf erzielt wurde; bei anderen mit derselben Eincylindermaschine ausgeführten Versuchen bei kleinerer Füllung fand Donkin, daß 8 oder 9 Prozent Manteldampf einen ca. 40-prozentigen Dampfgehalt erzielten; in diesem Falle bildete sich, wenn ohne Mantel gearbeitet wurde, eine außergewöhnlich große Anfangskondensation.

Bei Compoundmaschinen ist die Anwendung des Dampfmantels sehr wirksam, wenn die beiden, beziehungsweise sämtliche Mäntel mit Dampf von der Kesselspannung gefüllt sind. Bei den Versuchen Prof. Reynolds mit der Dreifachexpansionsmaschine wurde konstatiert, daß Dampf von der vollen Kesselspannung (13,6 kg/qcm) in allen Mänteln, die Anfangskondensation im zweiten Cylinder auf $\frac{1}{3}$ bis $\frac{1}{4}$ jenes Betrages verminderte, welcher ohne Mantelheizung gefunden wurde, den Arbeitsdampf im zweiten Cylinder vor Ende der Expansion nahezu trocknete und die Kondensation im dritten Cylinder fast vollständig verhinderte. Ohne Dampf in den Mänteln war der zweite und dritte Cylinder sehr naß; der Wassergehalt in denselben betrug etwa 40 Prozent.

In Abschnitt VII sind einige Indikatordiagramme dieser Versuche wiedergegeben.

Bei den Versuchen Donkins wurde die Temperatur an verschiedenen Punkten zwischen der inneren und äußeren Oberfläche der Cylinder in der Weise gemessen, daß in kleine gebohrte Löcher der Wand Thermometer eingesetzt wurden. So lange die Mäntel in Benutzung standen, war die mittlere Temperatur des Metalles nahezu gleich der Temperatur des Admissionsdampfes; bei ausgeschalteten Mänteln sank die Temperatur um ungefähr 30° C. Die an den Thermometern abgelesenen Temperaturen waren auch von innen nach außen nahezu gleich; die periodischen Abkühlungen der innersten Metallschicht während der Wiederverdampfung des Kondensates sind eben zu sehr auf die innere Oberfläche beschränkt oder mit anderen Worten, gehen zu wenig in die Tiefe des Metalles, um auf diesem Wege gemessen werden zu können.

91. Überhitzung. Wirksamer als der Dampfmantel zur Verhütung der Anfangskondensation ist nach den bis heute vorliegenden Erfahrungen die Anwendung überhitzten Dampfes, weil beim Eintritt des Dampfes in den Cylinder eine Wärmeabgabe an die Wandung keinen Niederschlag zur Folge hat, sondern nur eine Annäherung des Dampfes an den Sättigungszustand; die Überhitzung muß selbstverständlich so hoch sein, daß der Dampf nicht schon während der Admissionsperiode in den gesättigten Zustand übergeht. Vom rein thermodynamischen Standpunkte bringt die Überhitzung nur einen geringen Vorteil mit sich, wie bereits in § 61 erwähnt wurde, weil nur ein kleiner Teil der aufgenommenen Gesamtwärme

des Dampfes bei Temperaturen aufgenommen wird, welche höher sind als die Kesseltemperatur; der indirekte Vorteil der Überhitzung ist jedoch bedeutend größer.

In der Anwendung des überhitzten Dampfes bestehen bekanntlich zwei Hauptrichtungen und zwar die ältere, unter Beibehaltung der Dampfkessel und Dampfmaschinen gewöhnlicher Bauart, und die neuere durch Wilhelm Schmidt 1892 begründete Richtung, welche mit hoch überhitzten Dämpfen arbeitet und Kessel sowie Maschinen konstruktiv dem speziellen Zwecke anpaßt.

Die ersten Versuche, überhitzten Dampf zum Betriebe von Maschinen zu benutzen, scheinen im Anfange der fünfziger Jahre in den Vereinigten Staaten gemacht worden zu sein; fast gleichzeitig begann man mit Versuchen auch in Frankreich und England. Diese ersten Versuche erstreckten sich auf eine mit mehr oder minder unvollkommenen, im Fuchse oder unteren Teile des Kamins eingebauten Apparaten, erzielte Überhitzung zum Zwecke der besseren Ausnützung der Heizgase. Im Jahre 1856 veröffentlichte Hirn seine Versuche und stellte schon damals die Grundlagen der Ökonomie des Überhitzungsbetriebes fest; diese Frage wurde sodann im Zusammenhange mit der kalorimetrischen Untersuchungsmethode der Elsässer 1880 bis 1883 lebhaft erörtert. Hirn erreichte seinerzeit bereits Dampftemperaturen von 250° bei 4 Atm. Kesselspannungüberdruck, somit eine Überhitzung von ca. 100° C; seine Überhitzer waren auch bereits in der heute üblichen Form angeordnet. Hirn hatte somit dem Wesen nach jene Anordnung gewählt, die heute als die richtige erkannt ist.

Die Ergebnisse, die allseitig erzielt wurden, waren geradezu bestechend; trotzdem stellten sich der Einführung der Dampfüberhitzung bedeutende Hindernisse in den Weg; die alten Hanfstopfbüchsen und Schmieröle konnten der Überhitzung nicht widerstehen, auch waren die Überhitzer selbst sehr mangelhaft konstruiert, zumeist aus gußeisernen Schlangengeröhren bestehend, deren Packungen verbrannten und eine stete Quelle von Dampfverlusten bildeten. Außerdem fürchtete man, daß sich der Wasserdampf bei weitgehender Überhitzung in ein explosives Gemenge aus Wasserstoff und Sauerstoff zerlegen würde. Man versuchte daher den Dampf für die Maschine dadurch unschädlich zu machen, daß man überhitzten Dampf durch Mischung von sehr hoch überhitztem Dampf mit nassem Dampf herstellte; diese Methode ging von Amerika aus und wurde dann auch in England und Deutschland vorübergehend eingeführt.

Seit Mitte der sechziger Jahre trat in der Anwendung der Dampfüberhitzung ein allmählicher Stillstand ein und wurde sehr wenig auf diesem Gebiete gearbeitet. Der Hauptgrund für die Vernachlässigung dieser nicht lange vorher mit Begeisterung aufgegriffenen Frage lag darin,

daß man zu jener Zeit anfang, der Erhöhung des Dampfdruckes, der Ausbildung der mehrstufigen Expansion, sowie der zwangläufigen Ventilsteuerung größere Aufmerksamkeit zuzuwenden; auch hatte die Werkstättenarbeit inzwischen wesentliche Fortschritte gemacht.

Nachdem um das Jahr 1890 die auf dem Gebiete des Dampfmaschinenbaues durch Steigerung des Dampfdruckes im Vereine mit mehrstufiger Expansion erreichbaren Fortschritte bereits wieder an ihrer voraussichtlichen Grenze angelangt waren, die Entwicklung der modernen Dampfmaschine eine gewisse Vollendung erreicht hatte und der Bau derselben einförmig zu werden drohte, wendete sich die Aufmerksamkeit der Konstrukteure wieder der Bekämpfung des schlimmsten Feindes des ökonomischen Betriebes, der Eintrittskondensation, durch Anwendung der Dampfüberhitzung zu; auch war inzwischen über die Wechselwirkung zwischen Cylinderwandung und Dampf durch die wissenschaftlichen Arbeiten Hirns, der elsässer Schule u. a. Klarheit geschaffen und somit der Augenblick gekommen, wo der Dampfmaschinenbau zur Wiederaufnahme der Überhitzung vorbereitet war; die bisher bekannt gewordenen Ergebnisse lassen auch klar erkennen, daß auf diesem Wege das letzte Ziel der Entwicklung der Dampfmaschine, als Kolbenmaschine, liegen muß.

Die neue Bewegung wurde durch Überhitzer, welche an einzelnen Kesseln, namentlich an Wasserröhrenkesseln, angebracht wurden, eingeleitet und verfolgte anfänglich nur den Zweck der Dampftrocknung; darauf folgten die besonders geheizten Überhitzer von Uhler. Ausschlaggebend war jedoch der seit 1893 bekannte Überhitzer von Schwoerer, welcher infolge seiner besonderen Eignung für den Einbau bei den gewöhnlichen Kesselsystemen als auch für eigene Beheizung in kurzer Zeit eine ungemein verbreitete Anwendung gefunden hat. Schwoerer gebürt somit das Verdienst, die große Bedeutung der Dampfüberhitzung wieder zur Geltung gebracht zu haben; die Grenzen der verwendeten Überhitzungstemperaturen wurden durch ihn auf 250° bis 300° C hinaufgerückt; seit 1893 wurde in den meisten Fällen die Temperatur von 250° überschritten und stehen zahlreiche große Maschinenanlagen in anstandslosem Betriebe, welche mit Überhitzungstemperaturen arbeiten, die das Gebiet des sogenannten Heiß- oder Edeldampfes, das sind Temperaturen von 300° C gemessen am Cylinder, oder Überhitzungen von mindestens 100° C über die Sättigungstemperatur, erreichen.

Sehr beachtenswert ist, wie bereits vorhin bemerkt, unter den neueren Überhitzerkonstruktionen jene von W. Schmidt in Aschersleben, die mit sehr hoher Überhitzung zu arbeiten gestattet, ohne dabei das Material einer Temperatur auszusetzen, welche eine Verbrennung befürchten läßt.

Die Schmidtsche Konstruktion erregte seinerzeit gerechtes Aufsehen,

indem sie nicht nur mit großer Kühnheit das Ergebnis, worauf eine langsame Entwicklung führen mußte, gleich vorwegnahm und Überhitzungstemperaturen bis 350° C und darüber einfuhrte, sondern auch ganz neue und eigenartige konstruktive Mittel für Kessel und Maschinen benutzte, um einen verlässlichen und einfachen Betrieb zu sichern. Die Schmidtsche Heißdampfmaschine wurde anfänglich mit einfachwirkenden Dampfcylindern ausgeführt, wodurch die Kolbenstangen und Stopfbüchsen im Admissionsraume vermieden und auch die Kolbenringe in kühlere Partien des Cylinders verlegt wurden. Seit ihrem Bekanntwerden hat die Schmidtsche Konstruktion nicht nur in der Gesamtanordnung, sondern auch in der Detailausführung wesentliche Wandlungen und Klärungen erfahren; die Maschinen, welche bereits in zahlreichen, auch großen Ausführungen bis zu Leistungen von 1000 PS vorliegen, haben sich jedoch trotz der hohen Dampftemperaturen bei dauerndem Betriebe anstandslos bewährt*).

Die Anwendung der Dampfüberhitzung ist auf Grund der mit Überhitzungsbetrieben erzielten Erfolge und unterstützt durch eine Reihe von vorzüglichen Aufsätzen und zahlreichen Berichten über die erzielten Versuchsergebnisse in technischen Journalen, namentlich auch in der *Zeitschrift des Vereins deutscher Ingenieure*, eine allgemeine geworden. Trotz der großen Verdienste, welche sich W. Schmidt in dieser Richtung erworben, hat sich die Tätigkeit weitester Kreise doch in erster Linie nur auf die Überhitzung in Maschinen gewöhnlicher Bauart geworfen und es ist nicht zu verkennen, daß gerade auf dieser Grundlage die rasche und erfolgreiche Verbreitung des Überhitzungsbetriebes erzielbar war.

Auf die Dampfökonomie übergehend, sei zunächst erwähnt, daß Hirn bei seinen ersten Versuchen mit einer Kondensationsmaschine und einer Überhitzung um ca. 45° C eine Verminderung des Dampfverbrauches von 8,7 auf 7,25 kg/qcm per PS_i-Stunde konstatierte. Versuche, welche seitens der Gesellschaft Elsässischer Dampfkesselbesitzer 1892 mit einer großen Anzahl von Maschinen durchgeführt wurden, zeigten, daß durch die Überhitzung, wenn der Überhitzer in den letzten Kesselzug eingebaut ist, also ein Teil der sonst verlorenen Wärme nutzbar gemacht wird, eine Kohlenersparnis von ungefähr 20 Prozent erzielt werden kann; bei separat geheiztem Überhitzer verminderte sich die Ersparnis auf ungefähr 12 Prozent

*) Ausführliche Beschreibung und Zeichnungen der Schmidtschen Heißdampfmaschine siehe *Zeitschrift des Vereins deutscher Ingenieure*, Jahrg. 1895, S. 5: „*Untersuchung einer Heißdampfmaschinenanlage System Schmidt*“, von Prof. Schröter; Jahrg. 1896, S. 1390: „*Untersuchung an Schmidtschen Heißdampfmaschinen*“, von Prof. Gutermuth und Jahrg. 1897, S. 1402: „*Über Heißdampfmaschinen*“, von Prof. Seemann.

im Mittel. Mehrere der benutzten Versuchsmaschinen waren Großmaschinen mit Leistungen von 500 bis 600 PS_i; bei einem der Versuche, ausgeführt mit einer Sulzer Triplexmaschine von 300 PS_i, ergab sich ein Dampfverbrauch von 6,53 kg/qcm ohne Überhitzung und 5,19 kg/qcm pro PS_i-Stunde mit Überhitzung um 55° C; bei den übrigen Versuchen schwankte die Überhitzungstemperatur zwischen 30° und 50° C, in einzelnen Fällen auch mehr.

Die nachstehenden Versuche wurden von Willans mit einer schnelllaufenden Eincylinderkondensationsmaschine mit und ohne Überhitzung durchgeführt; die Maschine arbeitete mit halber Füllung. Obwohl somit die Verhältnisse derartige waren, daß kein besonderer Erfolg von der Überhitzung erwartet werden konnte, wurde doch, wie aus Tabelle IX hervorgeht, ein nicht unbedeutender Arbeitsgewinn erzielt.

Tabelle IX. Willans Maschine mit und ohne Überhitzung.

	3		2,4		1,7	
Anfangsspannung absolut in kg/qcm	134	151	125	148	115	143
Temperatur des Admissionsdampfes in C°	—	17	—	22	—	28
Überhitzungsbetrag	21	17	24	19	25	15
Prozentueller Wassergehalt mit Schluß der Füllung	11,93	11,0	12,91	11,80	13,4	11,80

Sehr instructive Versuche über den Vorteil der Überhitzung wurden in Deutschland von Prof. Schröter, Prof. Gutermuth und Prof. Seemann, in Österreich von Prof. Dörfel durchgeführt und die Ergebnisse derselben in der *Zeitschrift des Vereins deutscher Ingenieure* veröffentlicht*).

Die von Prof. Schröter mit der für eine Leistung von 1500 PS gebauten Dreifachexpansionsmaschine der Kammgarnspinnerei Augsburg durchgeführten Versuche erstreckten sich auf eine Leistung von 1000 beziehungsweise 1200 Pferdekkräfte, da die bestehende Kesselanlage nur einen Anfangsdruck im I. Cylinder von 6,8 kg/qcm gestattete; die Maschine selbst wurde jedoch für einen Admissionsdruck von 11 Atmosphären und eine Normalleistung von 1500 PS gebaut. Die Versuche wurden sowohl mit gesättigtem als auch mit überhitztem Dampf durchgeführt; die Dampftemperatur der Admission betrug für gesättigten Dampf im Mittel 164°, für überhitzten Dampf im Mittel 214° C, die Überhitzung selbst somit im Mittel 50° C.

Bei gesättigtem Dampfe und bei einer Leistung von 1200 PS betrug

*) Siehe außer den vorhin erwähnten Arbeiten von Prof. Schröter, Gutermuth und Seemann, Jahrg. 1896, S. 249: „*Vergleichende Versuche mit gesättigtem und überhitztem Dampf*“ an einer 1500-pferd. Dreifachexpansionsmaschine der Kammgarnspinnerei Augsburg, von Prof. Schröter, sowie Jahrg. 1899, S. 601: „*Die Anwendung überhitzten Dampfes zum Betriebe von Dampfmaschinen*“ von Prof. Dörfel.

der mittlere stündliche Dampfverbrauch pro PS; 6,39, bei überhitztem Dampfe 5,66 kg; daraus resultiert eine stündliche Ersparnis von 0,73 kg oder 11,4% des Verbrauches an gesättigtem Dampfe.

Bei der kleineren Leistung von 1000 PS betrug der Dampfverbrauch per PS_i-Stunde für gesättigtem Dampf 5,97, für überhitzten Dampf 5,38 kg; dies ergibt eine Ersparnis von 0,59 kg pro Stunde oder 9,9% des Verbrauches an gesättigtem Dampfe.

Für die Überhitzung um 50° C waren 24 W.E. erforderlich. Nehmen wir an, daß das kondensierte Wasser bei einer mittleren Temperatur von 40° C in den Kessel zurückgeleitet wurde, dann ist die pro kg Dampf aufgenommene Wärme abgerundet 616 W.E. bei gesättigtem und 640 W.E. bei überhitztem Dampf. Die pro PS_i-Stunde zugeführte Wärmemenge ist daher für die Leistung von 1200 PS und gesättigten beziehungsweise überhitzten Dampf 3936 beziehungsweise 3622 W.E.; für die Leistung von 1000 PS hingegen 3677 beziehungsweise 3443 W.E.

Dividiert man 634 W.E. d. i. das Wärmeäquivalent einer Pferdekraftstunde durch diese Zahlen (siehe § 95), dann ergibt sich der thermische Wirkungsgrad von 0,161 beziehungsweise 0,175 für die Leistung von 1200 und 0,172 beziehungsweise 0,184 für die Leistung von 1000 PS. Es findet somit eine 9- bis 7-prozentige Erhöhung des Wirkungsgrades zu Gunsten der Überhitzung statt.

Bei großen Dreifachexpansionsmaschinen mit Kesselspannungen von 12 Atmosphären Überdruck und auf rund 300° C überhitztem Dampf, kann man einen Dampfverbrauch pro PS_i und Stunde von 4,5 kg annehmen; die gleiche Maschine mit gesättigtem Dampf gespeist würde etwa 5,25 kg Dampf benötigen; daraus ergibt sich eine Ersparnis von 0,75 kg Dampf pro Stunde und PS_i oder rund 14 Prozent des Verbrauches an gesättigtem Dampfe. Die pro kg Dampf aufgenommene Wärme beträgt in diesem Falle 663,5 W.E. für den gesättigten und 717,7 W.E. für den überhitzten Dampf; nimmt man auch in diesem Falle an, daß das kondensierte Wasser mit einer Temperatur von 40° C in den Kessel zurückgeleitet wird, dann ist die pro PS_i und Stunde zugeführte Wärmemenge 3273 für gesättigten und 3050 W.E. für überhitzten Dampf, der thermische Wirkungsgrad nach früher somit 0,194 beziehungsweise 0,208; die Erhöhung des Wirkungsgrades zu Gunsten der Überhitzung beträgt daher 7 Prozent. Prof. Dörfel gibt in seiner vorhin erwähnten Arbeit (*Z. d. Ver. deutscher Ing.* 1899) den Verbrauch der Dreicylindermaschinen mit Kondensation und 10 bis 12 Atmosphären Eintrittsdruck mit 5,5 bis 6 kg Speisewasser für 1 PS_i-Stunde oder 3650 bis 4000 W.E. für gesättigten Dampf, welche Werte bei den besten bekannten Maschinen in großen Ausführungen 3400 bis 3500 W.E. erreichen. Bei einer Über-

hitzung auf etwa 260° ergab sich in einer Reihe von Fällen ein Verbrauch von rund 3300 W.E. Die letzteren Werte stehen mit den oben angegebenen Verbrauchsziffern in Übereinstimmung.

Bei der von Prof. Schröter untersuchten Dreifachexpansionsmaschine war, wie die Untersuchungen ergaben, die Überhitzung nicht hinreichend um zu verhindern, daß der Dampf während der Admission feucht wurde. Mit Schluß der Füllung im Hochdruckcylinder war der Dampf nahezu, aber doch nicht vollkommen trocken und nahm der Feuchtigkeitsgehalt während der Expansion in diesem Cylinder zu. Der Vorteil geringer Überhitzung liegt nur in der Reduktion der Verluste infolge des Wärmeaustausches zwischen Cylinderwandung und Dampf; obwohl der Dampf bis zum Eintritte in den Cylinder überhitzt bleibt, fällt er auf die Sättigungstemperatur ab, wenn er mit den Wandungen des Cylinders in Berührung kommt. Um denselben daher während der Admission trocken erhalten zu können, ist eine Überhitzung von mindestens 55° bis 60° , mitunter bedeutend mehr erforderlich, denn das Maß der Überhitzung hängt mit von dem Expansionsverhältnisse und von der Art des Cylinderschutzes gegen Abkühlung nach außen ab; um den Dampf auch während der Expansion trocken zu erhalten, ist selbstverständlich ein bedeutend höherer Überhitzungsgrad erforderlich. Mäßige Überhitzung kann somit als ein Mittel betrachtet werden, um die Wirkung der Cylinderwandung durch Annäherung der Expansionslinie des Indikator-diagramms an die Sättigungskurve (Figur 45 § 83) zu vermindern; gewöhnlich erreicht in solchen Fällen die Expansionslinie die Sättigungskurve kaum mit Expansionsbeginn, und in dem Maße, als die Expansion fortschreitet, vergrößert sich der Abstand zwischen beiden Kurven. Das ideale Diagramm (Figur 25 § 61) ist weit entfernt von dem Entropie-Temperaturdiagramm einer mit mäßig überhitztem Dampf arbeitenden Maschine, denn unter dem Einflusse der Cylinderwandung bleibt der Expansionsprozeß zur Linken der Sättigungskurve *cf*; und wenn auch die Arbeitssubstanz, bevor sie den Cylinder betritt, der Linie *cr* folgt, so fällt dieselbe jedoch sofort längs dieser Linie wieder ab, wenn sie in den Cylinder gelangt, bevor noch die Expansion beginnt, indem sie an die Wandungen die durch die Fläche unter *cr* dargestellte, während der Überhitzung aufgenommene Wärme abgibt; häufig gibt die Arbeitssubstanz sogar einen Teil ihrer latenten Wärme ab und wird noch während der Admission feucht. Bei höheren Überhitzungsgraden liegen diese Verhältnisse günstiger und wird nur ein Teil der Kurve *rc* von *r* gegen *c* zurückgelegt, bevor die Expansion beginnt.