

I. Abschnitt.

Die geschichtliche Entwicklung der Dampfmaschine.

Wissenschaftlich behandelt, kann die Dampfmaschine nur als Wärmekraftmaschine betrachtet werden, also als eine Maschine, welche Wärme in Arbeit umsetzt. Der Zweck, welchem die Maschine dient, kommt hierbei allerdings nicht in Betracht, und ließen sich von diesem Gesichtspunkte aus wohl noch andere Erklärungen des Begriffes Dampfmaschine geben, welche jedoch nur auf den Bau und die konstruktive Durchführung derselben, keineswegs aber auf das Wesen der Dampfmaschine als Wärmemotor Einfluß nehmen.

Die Thermodynamik fordert von jeder Wärmekraftmaschine möglichste Ausnützung der ihr zugeführten Wärmemenge, beziehungsweise des zur Erzeugung derselben verbrauchten Brennstoffes und wird daher von diesem höheren Gesichtspunkte aus betrachtet jene Wärmekraftmaschine, somit auch jene Dampfmaschine die bessere sein, bei welcher sich das Verhältnis des Wärmewertes der erzeugten Arbeit zur zugeführten Wärmemenge beziehungsweise zum Wärmewerte des hierzu verbrauchten Brennstoffes mehr der Einheit nähert; man nennt dieses Verhältnis den thermischen beziehungsweise wirtschaftlichen Wirkungsgrad der Maschine.

Die Ermittlung jener Faktoren, welche den Wirkungsgrad beeinflussen, die Bestimmung des theoretisch und praktisch erreichbaren Wertes desselben, sowie die Besprechung jener Methoden, welche zur direkten Messung des Wirkungsgrades dienen, sind daher auch Hauptaufgaben einer wissenschaftlichen Behandlung der Wärmekraftmaschinen und sollen somit auch in vorliegender Arbeit eingehende Berücksichtigung finden.

Der Prozeß der Umsetzung von Wärme in Arbeit, welcher sich im Arbeitscyylinder jeder aktiven Wärmekraftmaschine vollzieht, ist bei den Dampf- und Heißluftmaschinen von dem Prozesse der Wärmeerzeugung vollkommen, also örtlich und zeitlich getrennt, bei allen neueren Wärmemotoren (Gas- und Ölmaschinen) jedoch in dem Arbeitscyylinder vereint; die Verbrennung geht hierbei der Wärmeausnützung entweder unmittelbar

voraus oder fällt mit dem ersten Teile der Arbeitsperiode zusammen. Die Verbrennung erfolgt daher im ersten Falle in der Totlage der Maschine, also bei konstantem Volumen unter plötzlicher Drucksteigerung, somit explosionsartig; in letzterem Falle hingegen während der ersten Periode des Kolbenhubes, also bei zunehmendem Volumen, hat daher den Charakter einer eigentlichen oder langsamen Verbrennung. Man pflegt somit Maschinen der ersten Art **Explosionsmaschinen**, jene der zweiten Art **Verbrennungsmaschinen** zu nennen.

Die durch die räumliche und zeitliche Trennung der Wärmeerzeugung und Wärmeausnutzung verlorene sehr bedeutende Wärme beziehungsweise Arbeit ist eine Schattenseite aller Wärmemotoren, deren Wirkungsweise auf diesem Prinzipie beruht, also in erster Reihe der Dampfmaschinen. Die Dampfmaschine steht daher trotz ihrer hohen baulichen Vollendung und trotz der verhältnismäßig hohen Vollkommenheit des in der Maschine selbst sich vollziehenden Arbeitsprozesses in thermischer Beziehung weit hinter allen neuern Wärmekraftmaschinen zurück; dieselben haben daher auch heute bereits und namentlich seit Verwendung des billigeren Kraftgases, der Gichtgase, sowie der Rohöle eine hohe wirtschaftliche Bedeutung erlangt.

Die Dampfmaschine ist trotzdem, namentlich für große Leistungen, gegenwärtig noch das dominierende Maschinensystem, daher auch auf ihre wissenschaftliche Behandlung hier in erster Linie eingegangen werden soll.

Als Einleitung des Studiums der Dampfmaschine sei zunächst die geschichtliche Entwicklung derselben in ihren bedeutungsvollsten Momenten in Kürze besprochen. Es ist wohl selbstverständlich, daß hierbei die Arbeiten Watts in erster Linie Berücksichtigung finden, da seine Erfindungen nicht nur vermöge ihres wissenschaftlichen Interesses, sondern vornehmlich auch wegen ihrer hohen industriellen Bedeutung bahnbrechend waren und die Verdienste Watts um die Wärmekraftmaschine somit unvergänglich bleiben. Es darf hierbei aber nicht übersehen werden, daß der Erfindung Watts bereits ein Entwicklungsprozeß vorherging, welcher die Dampfmaschine gleichsam für die bahnbrechenden Verbesserungen vorbereitete, welche dieselbe durch die Hand dieses genialen Erfinders erfuhr. Die Arbeiten Watts standen naturgemäß im Zusammenhange mit jenen von Newcomen, diese mit den Arbeiten von Papin und Savery. Saverys Maschine war die erste praktische Verkörperung einer Idee, welche lange vorher bekannt war, jedoch mehr oder minder nur als künstliches Spielzeug Anwendung fand.

Die ersten authentischen Mitteilungen über Wärmemaschinen reichen ca. 2000 Jahre zurück und finden sich in dem Werke „*Pneumatica*“ von

Heron von Alexandria (um 120 v. Chr.); andere Werke desselben und zwar die Schrift über Wasseruhren, dessen „*Mechanica*“ und „*Barüllkon*“, wovon erstere von der Theorie der sogenannten fünf einfachen Maschinen, letztere von den Hebemaschinen handelte, sind verloren gegangen. Ein Auszug aus „*Barüllkon*“ von dem alexandrinischen Mathematiker Pappus, um die Zeit 284 bis 305 n. Chr. geschrieben, findet sich in dem Werke desselben „*Pappi Alexandrini collectionis, liber VIII*“.

Die „*Pneumatica*“ von Heron wurde zuerst von Abt Bernhard Baldo von Urbino in griechischer Sprache zu Augsburg gedruckt; dann erschienen zwei lateinische Übersetzungen 1575 und 1680 und im Jahre 1688 die erste deutsche Übersetzung von Carion zu Frankfurt a. M.

Überblickt man die Reihe von einschlägigen Mechanismen und Apparaten, welche seit Heron bis Beginn des 18. Jahrhunderts ersonnen und zum Teile auch ausgeführt wurden, so liegt fast allen der eine Gedanke zu Grunde, die Expansivkraft erwärmter Luft oder Dampfes zum Heben von Flüssigkeiten entweder als Endzweck oder als Mittel zur Erzeugung von Drehungen zu benützen. Damit gleichsam Hand in Hand erwachte die Erkenntnis, das durch Kondensation des Dampfes oder die Abkühlung der vorher erhitzten Luft gebildete Vacuum zum selbstthätigen Nachfüllen der betreffenden Gefäße benützen zu können. Derselbe Weg wurde immer und immer wieder betreten, ohne daß innerhalb dieses Zeitraumes von ca. 1800 Jahren ein neuer durchschlagender Gedanke zu verzeichnen gewesen wäre.

Von den zahlreichen Mechanismen, welche in Herons „*Pneumatica*“ beschrieben sind, seien nur jene herausgegriffen, welche die Wärme als Kraftquelle benützten, also als Uranfänge der heutigen Wärmekraftmaschine betrachtet werden können.

Eine dieser Vorrichtungen ist dem Wesen nach eine Dampf-Reaktionsturbine, bestehend aus einem cylindrischen, auf einer zentralen Spindel verzapften Gefäße, welchem durch einen der Zapfen Dampf zugeführt wird. Der Dampf entweicht durch tangential gestellte Röhren; infolge der Reaktionswirkung des ausblasenden Dampfes setzt sich das Gefäß in Drehung. Die Wirkung ist somit die gleiche wie jene des Segnerschen Wasserrades.

Eine andere Vorrichtung ist der in Fig. 1 (s. S. 4) abgebildete Apparat*). Derselbe ist dem Principe nach eine Heißluftmaschine zum selbstthätigen Öffnen und Schließen von Thüren. Die Aufgabe, welche sich Heron stellte, ging dahin, einen Tempel so einzurichten, daß nach

*) Aus Greenwoods Übersetzung von Herons *Pneumatica*, herausgegeben von B. Woodcroft, 1851.

dem Anzünden des Opferfeuers dessen geschlossene Türe von selbst aufgeht und sich nach dem Verlöschen des Feuers wieder selbsttätig schließt.

Unter dem Tempel befindet sich ein nach oben durch einen Boden abgeschlossener Raum; auf diesem Boden steht auch der hohle Altar;

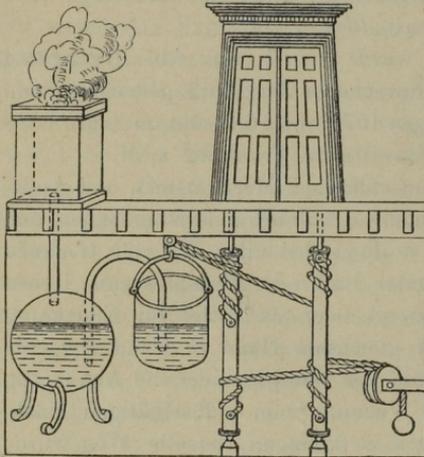


Fig. 1.

unter diesem durch eine Röhre mit demselben verbunden ist ein kugelförmiges, zur Hälfte mit Wasser gefülltes Gefäß. Die Drehachsen der beiden Flügel der Tempeltüre sind nach unten bis zum Fußboden des Souterrains verlängert; um dieselben sind zwei Seile oder Ketten geschlungen; die eine derselben trägt an ihrem über eine Leitrolle geführten freien Ende ein Gewicht, welches die Türflügel zu schließen strebt, an dem Ende der andern Kette, die verkehrt um die zweite Türachse geschlungen ist, hängt ein Gefäß, im leeren Zustande leichter

als das Gewicht. In dieses Gefäß mündet ein Π förmig gebogenes Rohr, dessen anderes Ende bis nahe zum Boden des vorhin erwähnten kugelförmigen Gefäßes führt; mit diesem Gefäße ist das Rohr fix verbunden.

Wird nun auf dem hohlen Altar Feuer angezündet, dann erwärmt sich der Altar und die in demselben eingeschlossene Luft, diese dehnt sich aus und drückt das Wasser aus der Kugel in das aufgehängte Gefäß, bis dieses, schwerer als das Gewicht an der zweiten Kette, niedersinkt und die Türe öffnet. Sobald das Feuer auf dem Altare erloschen, zieht sich die Luft zusammen, saugt das Wasser aus dem andern Gefäße in die Kugel zurück und das Gegengewicht zieht nun abwärts sinkend die Türe zu.

Eine Variante dieses Apparates unterscheidet sich dadurch von dem oben beschriebenen Mechanismus, daß an Stelle des Ballons ein im Souterrain liegender aus Ziegenhaut gebildeter Schlauch verwendet wird; auf diesem ruht ein Gewicht, welches die Stelle des beweglichen Gefäßes einnimmt und schwerer ist, als das am andern Ende der Kette aufgehängte Gegengewicht.

Ist der Altar kalt, dann drückt obiges Gewicht den Schlauch zusammen und schließt die Türe; wird das Feuer auf dem Altare ent-

zündet, dann bläht sich der Schlauch auf, hebt das Gewicht, das Gegengewicht kommt sinkend zur Wirkung und öffnet die Türe. — Dieser Mechanismus ist somit nur eine Vereinfachung des vorhin beschriebenen.

Von besonderem Interesse ist auch ein von Heron beschriebener Dampf- und Wasserkessel, Fig. 1a, welcher in konstruktiver Beziehung manches bietet, was auf unsere Zeit übergegangen ist. Dieser Kessel besteht aus einem stehenden cylindrischen oben und unten durch einen ringförmigen Boden geschlossenen Gefäße, welches von einem konzentrischen, beiderseits offenen Rohre durchsetzt und zum Teile mit Wasser gefüllt ist. Dieses Rohr, unter welchem sich die Feuerung befindet, ist außerdem durch mehrere vom Feuer bespülte Querröhren, durch welche das Wasser zirkuliert, mit dem Kessel verbunden. Das frische Wasser wird mittelst eines Trichters durch ein bis nahe zum Boden des Kessels reichendes Rohr eingebracht; in diesen Trichter mündet ein vom oberen Boden ausgehendes gekrümmtes Rohr, damit im Falle des Überkochens des Wassers durch dieses Rohr ein Überlaufen nach dem Trichter und Rückkehr des Wassers in den Kessel stattfinden kann. Durch ein anderes nach abwärts zur Feuerung führendes, von außen geheiztes, innen mit dem Dampfraum kommunizierendes Rohr wird Dampf in die Feuerung geblasen und diese beständig angefacht.

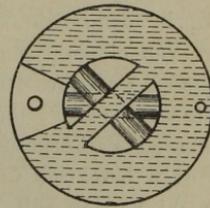
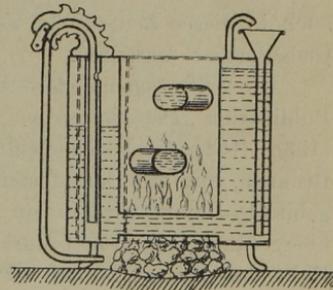


Fig. 1a.

Heron charakterisiert die zu lösende Aufgabe mit folgenden Worten:

„Einen Kochtopf herzurichten und eine Tierstatue daran zu setzen, welche bläst und sogar die Kohlen anbläst, daß sie brennen. — Überdies die Einrichtung zu treffen, daß eine am Halse des Topfes angebrachte offene Röhre nicht eher ausfließe, als wenn kaltes Wasser in einen Trichter geschüttet wird. Es soll sich aber das kalte Wasser erst dann mit dem warmen vereinigen, wenn es auf den Boden des Topfes gelangt und dort durch eine Röhre ausgeflossen ist.“

In diesem Apparate findet man daher bereits die innere Feuerung, wie bei den heutigen Cornwallkesseln; außerdem in den das Feuerrohr quer durchziehenden Wasserröhren das Prinzip der Gallowayröhren; sowie die Zufuhr des Wassers zum kühleren Teil des Kessels. Endlich hat

das Blaserohr, wie aus Fig. 1a hervorgeht, sehr viel Ähnlichkeit mit den heutigen Fieldröhren*).

Von der Zeit des Heron bis zum 17. Jahrhundert ist auf dem in Rede stehenden Gebiete kein weiterer Fortschritt zu verzeichnen; einzelne Mechanismen und Apparate für alltägliche Zwecke, als Orgelblasen, Wenden von Bratspießen, ähnlich den von Heron ersonnenen, fanden ab und zu auch in dieser Zeitperiode Verwendung, ohne jedoch irgend welche neue Gedanken zu enthalten.

Die erste bedeutendere Arbeit war nach Heron die 1606 erschienene Publikation „*Pneumaticorum, libri III*“ von Giovanni Battista della Porta (1538—1615), in welcher ein Apparat beschrieben wurde, ähnlich Herons Brunnen, nur mit Dampf statt Luft betätigt; der in einem eigenen Gefäße gebildete Dampf wird in ein zweites teilweise mit Wasser gefülltes Gefäß übergeführt und drückt durch ein nahe am Boden desselben mündendes Rohr das Wasser heraus. Porta spricht auch den Gedanken aus, daß die Kondensation des Dampfes in diesem Gefäße dazu benützt werden könnte, in demselben ein Vakuum zu bilden und mit Hilfe desselben Wasser von einem tiefer gelegenen Niveau anzusaugen. Tatsächlich enthält dieser Gedanke dem Wesen nach bereits das Prinzip, welches ein Jahrhundert später von Savery in dessen Dampfmaschine zur ersten brauchbaren Verkörperung gelangte.

Porta beschrieb unter andern auch einen Apparat, mit dessen Hilfe untersucht werden soll, „in wieviel Dampf eine bestimmte Wassermenge sich auflöst“. Trotz der großen Mangelhaftigkeit dieses Apparates ist dieser Versuch Portas doch als der erste zur quantitativen Bestimmung der Dampfmenge anzusehen, daher von großem Interesse. (Zeichnung und Beschreibung siehe Beck, „*Beiträge zur Geschichte des Maschinenbaues*“.)

Salomon de Caus (1576—1630) beschreibt in seinem 1615 erschienenen Werke: „*Les raisons des forces mouvantes*“ eine Dampffontaine, welche nur als eine Vereinfachung des von Porta ersonnenen Dampfspringbrunnens angesehen werden kann, indem beide Gefäße in einem einzigen vereint sind. De Caus beschreibt diesen Apparat wie folgt: „Nimm eine kupferne Kugel, welche überall wohl verwahrt und verlötet ist. Daran sei ein Spunt seitlich in der Wandung, durch den man das Wasser hineinbringt. Von oben geht eine Röhre beinahe bis auf den Boden der Kugel herab. Fülle diese Kugel mit Wasser, mache den Spunt gut zu

*) Ausführliche Beschreibung dieses Apparates bringt das Werk: Th. Beck, „*Beiträge zur Geschichte des Maschinenbaues*“, 1899, J. Springer in Berlin, welchem auch einige später folgende Mitteilungen entnommen sind.

und stelle sie auf ein Feuer, so wirst du sehen, wie die Hitze das Wasser in die Höhe treibt.“

Dieser Apparat ist die einzige „Dampfmaschine“, welche De Caus beschreibt. Obwohl derselbe keinen neuen Gedanken enthält, also nicht als ein weiteres Glied in der historischen Entwicklung der Wärmemaschine angesehen werden kann, sei dieser Apparat trotzdem hier ausdrücklich erwähnt, weil der berühmte französische Physiker Arago sich bemühte, De Caus auf Grund desselben als Erfinder der Dampfmaschine hinstellen, indem er die Ansicht vertrat, daß Marquis Worcester Salomon de Caus das Geheimnis von der Kraft des Dampfes abgeläuscht und als seine Erfindung hinstellend geraubt habe.

Im Jahre 1629 entwarf Giovanni Branca eine Maschine nach Art eines Wasserrades, bewegt durch den Stoß eines Dampfstrahles gegen dessen Flügel. Branca sucht somit die Aktionswirkung austretender Dampfstrahlen zum Umtriebe eines Rades auszunützen, während 1800 Jahre vor ihm Heron die Reaktionswirkung benützte; beide Ideen begegnen sich somit in dem Bestreben, das Energievermögen des Dampfes zur Bewegung einer direkt rotierenden Umtriebsmaschine auszubeuten. Brancas Gedanke war jedoch für jene Zeit unfruchtbar und erfolglos, und erst in neuerer Zeit wurde derselbe wieder aufgegriffen und nutzbringend verarbeitet. Man kehrte daher wieder zu den Ideen Portas und De Caus zurück, welche nun auch die Grundlagen der folgenden Erfindungen bildeten.

Der nächste Vorkämpfer war Edward Somerset, Marquis of Worcester, welchem das Verdienst gebührt, die erste Dampfmaschine beschrieben, vielleicht auch gebaut zu haben, worüber leider authentische Mitteilungen fehlen. Auch Worcester strebte in erster Linie gleich allen seinen Vorgängern den Zweck an, Wasser künstlich zu heben; sein Problem war im Prinzip identisch mit Portas früher besprochenem Modell und unterschied sich von diesem nur dadurch, daß das mit Wasser gefüllte Gefäß in zwei vollkommen getrennte Räume abgeteilt war, welche abwechselungsweise mit dem Dampfessel in Verbindung gebracht, beziehungsweise infolge der Kondensation des Dampfes neuerdings gefüllt wurden, wodurch ein kontinuierlicher Wasserstrahl erzeugt werden konnte. Die einzige Beschreibung dieses Apparates findet sich im Art. 68 von Worcester's *Century of Inventions* (1663). Diese Beschreibung ist aber so knapp und mangelhaft, ohne jedwede Zeichnung, daß es sehr schwer ist, zu beurteilen, ob mit Ausnahme der Doppelwirkung irgend welche neue Gedanken zum Ausdrucke kamen.

Worcester nennt sein Problem „*Ein Feuer-Wasser-Werk*“ und bezeichnet es selbst als einen wunderbaren und äußerst wirksamen Weg, um Wasser durch Feuer auf beliebige Höhen treiben zu können; die Druckhöhe ist nur begrenzt durch die Widerstandsfähigkeit des Kessels.

Worcester machte selbst Versuche, um sich von der Widerstandsfähigkeit des Materials einen Begriff zu machen, indem er ein abgebrochenes Kanonenrohr verstopfte und verschraubte, teilweise mit Wasser füllte und dem Feuer aussetzte; nach 24 Stunden zersprang dasselbe mit lautem Knall. Vermöge der Kombination zweier Gefäße, die abwechselnd mit dem Kessel in Verbindung gebracht wurden, konnte ein ununterbrochener Wasserstrahl von 40 Fuß Höhe erzielt werden. Worcesters Versuch mit der Kanone läßt auch darauf schließen, daß er hochgespannten Dampf benutzte, somit seine Experimente bereits als Anfang der **Hochdruck-Dampfmaschine** angesehen werden können, wenn auch der Apparat als solcher noch keine Ähnlichkeit mit einer Dampfmaschine hatte. Spätere Berichte in Worcesters *Century of Inventions* erwähnen einen Entwurf, welcher unter dem Namen „*Water-commanding-Engine*“ bekannt war, von Seite des Staates unterstützt und von Worcester im großen Stile experimentell erprobt wurde. Auch diese Berichte sind so mangelhaft, daß daraus das Wesen dieser Erfindung nicht klar genug hervorgeht; die Maschine scheint viel mehr ein Perpetuum mobile als eine Wärmekraftmaschine gewesen zu sein. Die Experimente führten auch zu keinem praktischen Ergebnis.

Erst zu Ende des 17. Jahrhunderts gelangte die Dampfmaschine zu praktischer Bedeutung. **Thomas Savery** erhielt 1698 ein Patent auf eine Wasserhebemaschine (Fig. 2), in welcher bereits die Expansivkraft des Dampfes sowie das Vakuum vereint zur Wirkung gelangen.

Von dem Hauptkessel *F* gelangt Dampf abwechslungsweise in eines der ovalen oder blasenförmigen Gefäße *A* und drückt vermittelst des Rückschlagventiles *B* das in demselben befindliche Wasser in die Höhe. Sobald das Gefäß *A* entleert ist, wird die Dampfzufuhr unterbrochen und der rückständige Dampf kondensiert, indem sich aus einer höher gelegenen Zisterne ein Strahl kalten Wassers über das Gefäß *A* ergießt und dessen Wandung abkühlt; infolge des gebildeten Vakuums wird das Gefäß durch das Rohr *C* und das Ventil *D* neuerdings gefüllt. In-

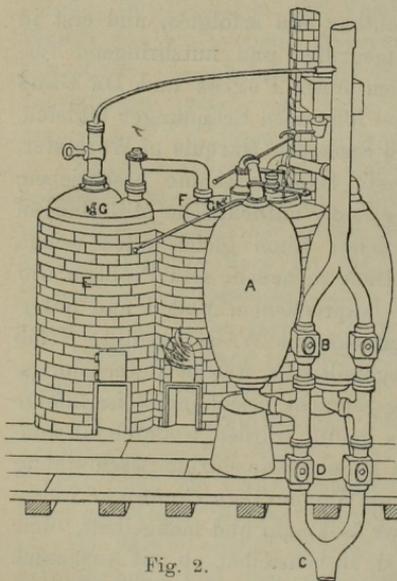


Fig. 2.

Saverys Pumpmaschine, 1698.

gelegenen Zisterne ein Strahl kalten Wassers über das Gefäß *A* ergießt und dessen Wandung abkühlt; infolge des gebildeten Vakuums wird das Gefäß durch das Rohr *C* und das Ventil *D* neuerdings gefüllt. In-

zwischen wurde das andere Gefäß entleert und auf diese Weise wechselt das Spiel fortwährend ab. Die beiden Ventile oder Klappen *B* und *D* öffnen nur aufwärts, um sich beim Überdruck zu schließen.

Der Hauptkessel *F* wird von einem Speisekessel *E* aus gespeist; dieser wird im kalten Zustande gefüllt; sobald er angeheizt ist, funktioniert er in gleicher Weise wie der Kessel von De Caus, indem er das in ihm befindliche Wasser in den Hauptkessel drückt.

Die **Probierhähne** (*G*) zur Bestimmung des Wasserstandes im Kessel sind gleichfalls ein bemerkenswertes Detail.

Saverys Maschine wurde auch mit nur einem Wassergefäße, also einfachwirkend ausgeführt. Savery gebürt somit das Verdienst, die Kondensation durch künstliche Mittel durchgeführt und zum Ansaugen des Wassers von einem tiefer gelegenen Niveau ausgenützt zu haben; jedenfalls war die von Savery durchgeführte Arbeitsmethode ein wesentlicher Fortschritt gegenüber der von Worcester vorgeschlagenen, vielleicht auch benützten Methode der Wasserförderung und seine Maschine die erste wirklich brauchbare Dampfpumpmaschine. Die Maschine fand daher auch zahlreiche Verwendung im Bergbau, zur Hebung von Wasser in Häusern und Städten, sogar zur Speisung von Wasserrädern. Die Verwendung als Bergbaupumpe war allerdings dadurch beschränkt, daß die Förderhöhe von der Dampfspannung abhängig und somit begrenzt war, obgleich Pressungen bis 8 sogar 10 Atmosphären und nebenbei bemerkt ohne Sicherheitsventil verwendet wurden. Diese hohen Spannungen bereiteten Savery große Sorge; die gewöhnlichen Lötmitel schmolzen und sah er sich gezwungen, schwer schmelzbares Lot anzuwenden. Außer diesem Übelstande war der Verbrauch an Brennmateriale ein enormer infolge der Kondensation des Dampfes an den nach jedem Spiel abgekühlten Gefäßwandungen und der steten Berührung mit dem Wasserspiegel selbst. Nach den Mitteilungen Saverys über den Brennstoffverbrauch dürfte dieser für gleiche Leistung mindestens 20 mal größer gewesen sein, als der Verbrauch einer heutigen guten Dampfmaschine. In einer Abhandlung „*The Miner's Friend*“ (des Bergmanns Freund) äußert sich Savery hierüber mit folgenden Worten: „Soweit das Gefäß innen mit dem Kesseldampf in Berührung steht, ist es außen trocken und so heiß, daß man es mit der Hand ohne sich zu verbrennen, nicht berühren kann; aber soweit die jeweilige Wasserfüllung reicht, ist die Außenwand kalt und so naß, als ob das Gefäß durchlässig wäre. Mit dem Sinken des Wasserspiegels verschwindet auch die äußere Kälte und Feuchtigkeit des Gefäßes.“

Saverys Maschine wurde in späteren Jahren durch Desaguliers insofern verbessert, als derselbe einerseits Sicherheitsventile (erfunden durch Papin) anwendete und andererseits die Oberflächenkondensation durch

direkte Berührung des Dampfes mit einem Strahle kalten Wassers ersetzte, welcher in das Gefäß eingespritzt wurde.

Savery soll auch als erster den Ausdruck „Pferdestärke“ zum Messen der Leistung seiner Maschine gebraucht haben.

Es sei an dieser Stelle einer Maschine gedacht, welche allerdings außer Zusammenhang mit der stufenweisen Entwicklung der Dampfmaschine steht, jedoch als erster Vorläufer unserer neueren Wärmemotoren angesehen werden kann, wenngleich dieselbe über das Stadium des Experimentes nicht hinauskam, daher auch keine praktischen Erfolge zu erzielen vermochte. Etwa 20 Jahre vor dem Zeitpunkte von Saverys Patent wurde von verschiedenen Erfindern der Vorschlag gemacht, die Explosionskraft des Schießpulvers zum Heben von Wasser auszunützen. Wieweit diese Versuche zurückreichen, läßt sich überhaupt nicht genau bestimmen; nach einzelnen Quellen soll Abbé Hautefeuille 1678 die erste Idee einer **Pulvermaschine** gefaßt haben; seine Idee soll dann 1680 von Huygens in einem Versuchsmodelle verkörpert, von Papin jedoch verbessert und 1688 als seine Erfindung beschrieben worden sein. Diese Probleme gipfelten darin, in einem geschlossenen Gefäße Pulver zur Explosion zu bringen und die sich momentan entwickelnden Gase durch nach außen offene Klappen auspuffen zu lassen. Die im Gefäße zurückbleibenden Gase ziehen sich nach dem Erkalten zusammen, es bildet sich ein teilweises Vakuum, welches nun dazu benutzt werden soll, Wasser von einem entsprechend tiefer gelegenen Niveau zu heben.

Huygens verkörperte dieses Problem und indem er bei seinem Versuchsmodelle einen Cylinder und Kolben anwendete, war er zugleich der erste, welcher diese beiden hochwertigen Elemente bei dem Baue der Wärmemaschine einführte.

Huygens Pulvermaschine bestand aus einem stehenden Cylinder, in welchem sich ein Kolben bewegte; vor Explosion der Pulverladung stellte er den Kolben an das obere Ende des beiderseits geschlossenen Cylinders. Nach der Explosion der Pulverladung, deren Produkte durch Klappen ins Freie schlugen, bildete sich unter dem Kolben ein teilweises Vakuum und der Kolben ging unter dem Drucke der Atmosphäre arbeitverrichtend nach abwärts. Die Bewegung wurde mittelst Schnur und Rolle auf ein Gewicht übertragen und dieses gehoben. Huygens Explosionsmaschine beruhte somit auf demselben Arbeitsprinzipie, welches ca. 200 Jahre später in der atmosphärischen Gaskraftmaschine mit durchschlagendem Erfolge zur Anwendung gelangte.

Im Jahre 1690 kam Denis Papin, welcher zehn Jahre vorher das Sicherheitsventil ersonnen und angewendet hatte, auf die Vermutung,

daß statt durch Verpuffung von Schießpulver in geschlossenem Raume, ein viel wirksameres Vakuum durch Kondensation von Dampf in einem Cylinder erzielt werden könnte, dessen Kolben vorher durch die Expansivkraft des Dampfes gehoben wurde.

Papin beobachtete gelegentlich seiner Versuche mit Huygens Pulvermaschine, daß nach der Explosion soviel Gase in dem Cylinder zurückblieben, daß nach dem Erkalten derselben noch ca. $\frac{1}{5}$ des Cylinder volumens gefüllt war, somit auf diesem Wege ein verhältnismäßig geringes Vakuum erreicht wurde; er studierte daher über Mittel und Wege zur Erzielung eines besseren Vakuums. Papin schildert seinen Gedankengang selbst in folgenden Worten: „Auf einem anderen Wege bemühte ich mich, die Aufgabe zu lösen; die Eigentümlichkeit des Wassers, daß eine kleine Menge desselben durch Wärme in Dampf verwandelt, dieselben Eigenschaften besitzt wie Luft, aber wenn abgekühlt, wieder zu Wasser wird, ohne daß eine Spur der früheren Elastizität zurückbleibt, ließ mich auf die Möglichkeit schließen, eine Maschine zu konstruieren, in welcher durch Wasser ohne großen Wärmearaufwand, also mit geringen Kosten, ein so vollkommenes Vakuum erzielt werden könne, wie es durch die Benützung von Schießpulver nicht erzielt werden kann.“

Papins Dampfmaschine vereinigte Kessel und Dampfeylinder in einem Gefäße; der Boden desselben wurde erhitzt, nachdem vorher eine kleine Menge Wasser eingebracht war. Nachdem der Kolben in die Höhe gestiegen, wurde das Feuer entfernt, der Dampf kühlte ab und kondensierte; unter dem Drucke der Atmosphäre ging der Kolben arbeitend wieder in seine untere Lage zurück.

Papin erzielte mit dieser Maschine vermöge ihrer Anordnung keine Erfolge; und erst Newcomen war es vorbehalten, durch Trennung von Kessel und Arbeitscylinder eine arbeitsfähige Maschine zu bilden.

Als Papin 1705 von Saverys Maschine Kenntnis erhielt, wendete er seine Aufmerksamkeit der Verbesserung dieser Maschine zu und dachte eine modifizierte Anordnung nach Fig. 3 (s. S. 12).

In dem teilweise mit Wasser gefüllten Cylinder *A* schwimmt auf dem Wasserspiegel eine Art Kolben, beziehungsweise eine Scheidewand, um die direkte Berührung des Dampfes mit dem Wasser zu verhindern. Der aus dem Dampfkessel übergeführte Dampf drückt das Wasser durch Vermittlung dieses Kolbens in das Reservoir *B*, von wo es in einem geschlossenen Strahl in die Schaufelräume eines Wasserrades überströmt. Nachdem der Dampf auf diese Weise seine Arbeit verrichtet hat, entweicht er durch den Hahn *C*. Diese zweite Papinsche Maschine war somit eine einfach wirkende Dampfmaschine ohne Kondensation, bei welcher Dampf und Pumpcylinder in einem Stücke vereint war. Ein in seiner

Art sonderbares Detail dieser Maschine ist der sogenannte „Heizer“ *D*, ein kleiner Cylinder aus hochoverhitztem Metall, eingelegt in dem Kolben, um den darüber stehenden Dampf trocken zu halten.

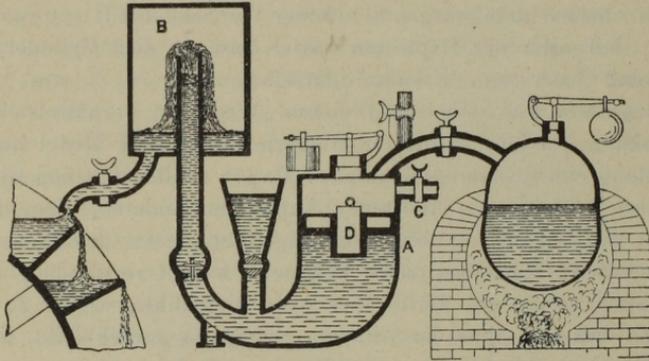


Fig. 3. Papins Abänderung von Saverys Maschine, 1705.

Unter den vielen Erfindungen Papins sei nur noch ein Kessel erwähnt, mit einer geschlossenen Feuerbüchse, als erster Versuch einer Konstruktion, welche seitdem eine so allgemeine Anwendung gefunden hat*).

Papin war ein ideenreicher Erfinder, aber in der Verkörperung seiner Probleme im allgemeinen kein glücklicher Konstrukteur.

Während Papin, seine erste Kolbenmaschine verlassend, auf Saverys unreife Konstruktion zurückgriff und seine Tätigkeit erfolglos auf Verbesserung derselben konzentrierte, widmete sich ein anderer Erfinder der Vervollkommnung der Kolbenmaschine, durch Trennung des Kessels vom Arbeitscylinder, sowie durch Benützung der bereits von Savery angewendeten künstlichen Mittel zur Kondensation des Dampfes, praktische Erfolge erzielend.

Dieser Erfinder war **Newcomen**, welcher im Jahre 1705 in Verbindung mit Savery und Cawley der Dampfmaschine die in Fig. 4 abgebildete Anordnung gab.

Der Kolben war durch eine Kette mit einem über der Maschine gelagerten Balancier verbunden und sein Gewicht durch ein nahe dem anderen Ende desselben angebrachtes Gegengewicht nahezu ausgeglichen. Sobald der Cylinder mit dem Kessel in Verbindung gebracht wurde, stieg der Kolben

*) Ausführlicheres über die Erfindungen Papins siehe „sein Leben und seine Korrespondenz mit Leibniz und Huygens“, von Dr. E. Gerland, Berlin 1881; sowie „Muirhead's Life of Watt“.

mit etwas Überdruck seitens des Dampfes von unten und dem Einflusse des Gegengewichtes in die Höhe; das Dampfventil wurde geschlossen und ein Strahl kalten Wassers spritzte in den Cylinder und kondensierte den Dampf. Infolge des Vakuums wurde nun der Kolben durch den

Atmosphärendruck herabgedrückt und betätigte die Pumpe durch Vermittlung einer vom freien Ende des Balanciers herabhängenden langen Stange. Einspritzwasser und Kondensat wurden durch den neuerdings eintretenden Dampf mit Hilfe eines Austrittsventiles ausgestoßen und das Spiel wiederholte sich.

Der Kolben wurde durch einen mit Eisen armierten Lederstulp und eine auf demselben befindliche und stetig erneuerte Wasserschicht abgedichtet.

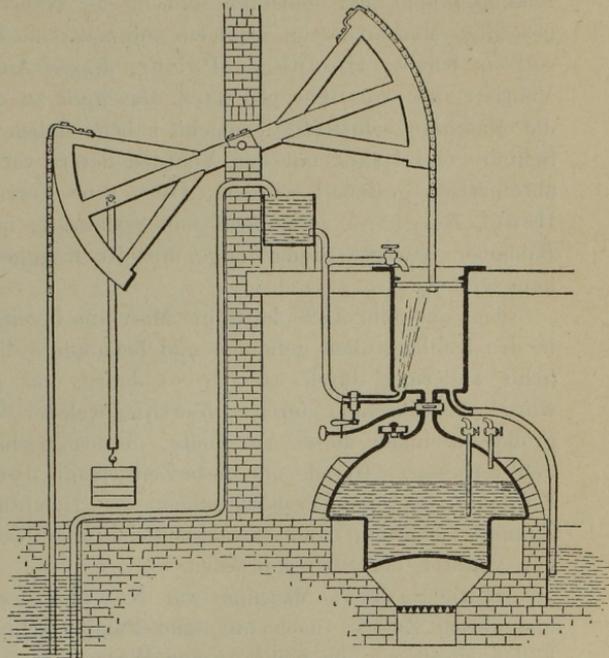


Fig. 4. Newcomens atmosphärische Maschine, 1705.

Anfänglich wurde die Kondensation durch äußere Abkühlung des Cylinders erreicht; durch eine undichte Stelle der Packung kam jedoch einmal zufällig Wasser in den Cylinder, erwies den Vorteil der Einspritzkondensation und hatte zur Folge, daß nunmehr derselbe an Stelle der Oberflächenkondensation angewendet wurde.

Der in diesen Maschinen zur Verwendung gelangte Dampf hatte sehr geringe Spannung, gleich oder weniger größer wie der Atmosphärendruck; manchmal wurde sogar mit ausgehobenem Mannlochdeckel gearbeitet; der Dampf hatte ja nur den Zweck, die Aufwärtsbewegung des Kolbens durch Ausgleich des Druckes über und unter demselben zu ermöglichen und durch Kondensation das Vakuum herzustellen.

Newcomens Maschine war somit eine Vereinigung des Cylinders und Kolbens von Papin mit dem getrennten Kessel Saverys.

Um das Jahr 1711 begann Newcomens Maschine als Bergbaupumpe Eingang zu finden. Es ist nicht erwiesen, ob die Maschine ursprünglich selbsttätig arbeitete oder von dem Wärter, durch periodisches Verstellen der Hähne, in regelrechtem Gange erhalten wurde; eine alte Abbildung einer 1712 gebauten und in der Nähe von Dudley Castle aufgestellten Maschine zeigt wohl ein automatisches Stellzeug. Im Jahre 1713 soll ein Knabe, Humphrey Potter, dessen Aufgabe darin bestand, die Ventile einer von ihm bedienten Maschine zu öffnen und zu schließen, die Maschine selbsttätig gemacht haben, indem er den Balancier durch Schnüre und Haken mit den Ventilen derart verband, daß dieselben nun automatisch gesteuert wurden. Diese rohe Vorrichtung wurde 1718 von Henry Beighton vereinfacht und verbessert, indem er durch eine vom Balancier bewegte Steuerstange mittelst Knaggen die Ventile in Tätigkeit setzte*).

Um das Jahr 1725 hatte die Maschine bereits allgemeine Anwendung in den Kohlengruben gefunden und behauptete diesen Platz ohne wesentliche Änderung durch ca. 70—80 Jahre; nur gegen Ende dieser Zeit wurde die Maschine durch Smeaton, welcher um das Jahr 1770 viele große Maschinen dieser Art baute, in den mechanischen Details wesentlich verbessert. Gerade um diese Zeit ersann James Watt jene genialen Einrichtungen und Verbesserungen der Dampfmaschine, welche deren Zukunft sicherten; damit wurde zugleich über Newcomens Maschine, als nun veraltet, der Stab gebrochen.

Sowie Saverys Maschine war Newcomens Maschine ihrer Bauart und ihrem Zwecke nach nur eine Pumpmaschine; nur in vereinzelt Fällen wurde sie zur Speisung von Wasserrädern behufs Antrieb anderer Maschinen verwendet.

Verglichen mit Saverys Maschine konnte sie insofern als ein wesentlicher Fortschritt bezeichnet werden, als die Pressungs- oder Förderhöhe der Pumpe unabhängig war von der Dampfspannung, daher durch Reduktion des Plungerdiameters beliebig hoch getrieben werden konnte. Die Dampfverschwendung zufolge des Umstandes, daß das Gefäß, in welchem der Dampf zur Wirkung gelangte, abwechselnd erhitzt und wieder abgekühlt wurde, war eine Schattenseite beider Maschinen und in dieser Hinsicht war Newcomens Maschine kaum besser als jene Saverys.

*) In der *Zeitschrift des Vereins deutscher Ingenieure* Jahrg. 1894 S. 1468 ist die Photographie einer Newcomenschen Maschine reproduziert, welche von Newcomen kurz nach dem Jahre 1700 gebaut wurde, zum Betriebe eines Bergwerkes im Fairbottom-Tale diente und um das Jahr 1830 außer Betrieb gekommen sein dürfte. — Ein Bericht über diese Maschine ist im Oktoberheft S. 448 und 453 Jahrg. 1894 der *Zeitschrift Engineering* enthalten.

So vorbereitet kam die Dampfmaschine in die Hände des größten Erfinders des achtzehnten Jahrhunderts, James Watt.

James Watt, Instrumentenmacher in Glasgow, wurde seitens der Universität Glasgow 1763 beauftragt, ein daselbst befindliches Modell einer Newcomenmaschine zu reparieren; der Kessel dieses Modelles war etwas kleiner als ein gewöhnlicher Theekessel, der Kolben hatte 2" Durchmesser und 6" Hub. Als er die Maschine repariert und in Gang gesetzt hatte, ergab sich, daß der Kessel nicht genug Dampf liefern konnte und die Maschine daher nach wenigen Hüben stehen blieb, trotzdem Watt das Feuer so heftig als möglich anfachte. Gerade diese Wahrnehmung regte Watt ungemein an, die Maschine zu verbessern. Er zog zunächst seine Bücher zu Rat, jedoch ohne Erfolg. Nun suchte er auf dem Wege selbständiger Experimente diese Aufgabe zu lösen; dabei fand er, daß Dampf von 80° Temperatur instande ist, die sechsfache Gewichtsmenge Wasser auf dieselbe Temperatur zu erwärmen. Auf diese Weise zur Erkenntnis gelangt, daß Dampf ein Wärmereservoir bildet, trachtete er um so sparsamer damit umzugehen. An dem Modell vergrößerte er zunächst die Heizfläche, umkleidete alles soviel als möglich mit schlechten Wärmeleitern, jedoch ohne damit einen genügenden Erfolg zu erzielen. Watt fand nun, daß die größten Wärmeverluste durch die Kondensation des Dampfes im Cylinder selbst verursacht werden, indem an den kalten Wandungen des Cylinders $\frac{4}{5}$ des frisch einströmenden Dampfes sich kondensierte, bevor der Rest des Dampfes auf den Kolben einen Druck auszuüben vermochte. Er schloß daraus auf die Notwendigkeit, **den Cylinder so heifs zu erhalten wie den eintretenden Dampf**; diese Bedingung sowie der Umstand, daß der Dampf andererseits auf 30° R. abgekühlt werden mußte, um sich vollständig zu kondensieren, standen jedoch im vollen Gegensatze und bereiteten Watt große Schwierigkeiten in der Lösung der sich gestellten Aufgabe. Lange Zeit wollte ihm dieselbe nicht gelingen, von vielen Irrlichtern irre geleitet, bis er endlich auf den Gedanken kam, die Kondensation des Dampfes in einem **eigenen**, vom Dampfzylinder **getrennten** Gefäße durchzuführen. In Ausführung dieses Gedankens gliederte er an die Maschine ein neues Organ, den **Kondensator**, an, in welchen der Dampf aus dem Cylinder überströmte, um darin durch Oberflächenkühlung oder Einspritzwasser niedergeschlagen zu werden. Um das Vakuum im Kondensator zu erhalten, fügte Watt noch eine **Pumpe**, **Luftpumpe** genannt, hinzu, welche das Kondensat, das Einspritzwasser und die durch Undichtheiten eindringende oder mit dem Wasser und dem Dampfe eingeführte Luft herauszuschaffen hatte.

Nachdem auf diese Weise der Cylinder nicht mehr zur Kondensation diente, somit auch nicht mehr mit dem Kühlwasser in Berührung kam,

war es möglich, denselben fortwährend heiß zu erhalten; durch Verwendung schlecht wärmeleitender Hüllen, speziell durch Anwendung eines eigenen **Dampfmantels**, dann durch Anbringung eines oberen Cylinderdeckels mit Stopfbüchse für die Kolbenstange, erreichte er nicht nur diesen Zweck, sondern durch letzteres Detail auch die Möglichkeit, über dem Kolben Dampf statt Luft einführen zu können, wodurch bei gleicher Größe des Cylinders größere Leistungsfähigkeit erzielt werden konnte.

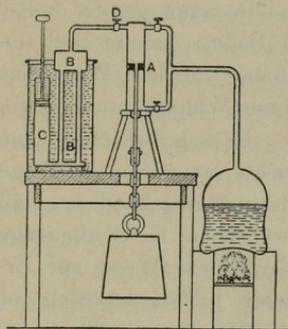


Fig. 5. Watts Versuchsapparat.

Kaum war Watt auf diese Gedanken gekommen, so trachtete er dieselben praktisch durchzuführen und konstruierte den in Fig. 5 skizzierten Versuchsapparat.

A ist der Cylinder; B der Kondensator (als Oberflächenkondensator nach der heute gebräuchlichen Anordnung); C die Luftpumpe. Der Dampf wurde über dem Kolben eingeführt und im Kondensator ein Vakuum hergestellt; sobald der Hahn D geöffnet wurde, strömte der Dampf nach dem Kondensator, verdichtete und infolge des Vakuums über dem Kolben stieg dieser in die Höhe und hob ein Gewicht.

Nach verschiedenen in dieser Richtung ausgeführten Versuchen patentierte Watt 1769 diese seine Verbesserungen. Dieselben sind in der Erläuterung zu seinem Patente mit nachstehenden Worten beschrieben, welche, abgesehen von ihrem historischen Interesse, schon deshalb verdienen sorgfältig studiert zu werden, weil in denselben bereits jene Prinzipien klargelegt sind, welche noch heute die Grundlagen einer wissenschaftlichen Behandlung der Dampfmaschine bilden.

„Meine Methode, den Verbrauch an Dampf, somit an Brennstoff, zu verringern, stützt sich auf folgende Gesichtspunkte:

„... **Erstens:** Jenes Gefäß, in welchem sich die Kraft des Dampfes entwickelt, um die Maschine zu treiben, in gewöhnlichen Feuermaschinen Cylinder, von mir jedoch das Dampfgefäß genannt, muß, solange die Maschine arbeitet, so heiß erhalten werden, als der eintretende Dampf und zwar einerseits durch Umhüllung desselben mit einem Holzmantel oder irgend einem schlecht wärmeleitenden Material; andererseits dadurch, daß dasselbe von Dampf oder irgend einer auf die Dampftemperatur erhitzten Substanz umgeben wird, und drittens durch Vermeidung äußeren oder inneren Kontaktes des Dampfgefäßes mit Wasser oder einer Substanz von niedrigerer Temperatur als Dampf.

„**Zweitens:** Maschinen, entweder ausschließlich oder nur zum Teil

durch Kondensation arbeitend, sollen zum Zwecke der Kondensation eigene vom Dampfzylinder getrennte und mit diesem nur periodenweise kommunizierende Gefäße erhalten; diese Gefäße nenne ich Kondensatoren. Diese Kondensatoren sind unter Verwendung von Wasser oder anderen kalten Substanzen mindestens so kalt zu erhalten als die sie umgebende Luft.

Drittens: Luft und die nichtkondensierten Dampfdruckstände müssen, um die Wirkung der Maschine nicht zu beeinflussen, durch eine von der Maschine selbst oder auf andere Weise betätigte Pumpe aus dem Kondensator entfernt werden.

Viertens: Ich beabsichtige in mancherlei Fällen, die Expansivkraft des Dampfes auch von oben auf den Kolben oder ein denselben ersetzendes Detail in gleicher Weise einwirken zu lassen, wie die Pressung der Atmosphäre bei den gewöhnlichen Feuermaschinen nutzbar gemacht wird. In Fällen, wo die zur Kondensation erforderliche Wassermenge nicht zur Verfügung steht, kann die Maschine auch durch die Kraft des Dampfes allein betrieben werden, indem der verbrauchte Dampf in die Atmosphäre ausgestoßen wird.

Sechstens: In einzelnen Fällen beabsichtige ich, den Dampf nur soweit abzukühlen, daß er sich zusammenzieht ohne zu kondensieren, derart, daß die Maschine infolge der abwechselnden Ausdehnung und Kontraktion des Dampfes arbeitet.

Endlich: Statt der Abdichtung des Kolbens und anderer Teile der Maschine durch Wasser, wende ich Öl, Wachs, harzige Substanzen, tierisches Fett, Quecksilber oder andere Metalle im flüssigen Zustande an . . .“

Der fünfte Patentanspruch bezog sich auf rotierende Maschinen und ist somit hier gegenstandslos.

Mit dem Ausdrucke „Feuermaschine“ bezeichnete Watt die Dampfmaschine oder wie sie gewöhnlich genannt wurde, die „atmosphärische“ Maschine von Newcomen.

Von so hoher Bedeutung Watts erstes Patent für jene Zeit auch war, so ging daraus anfänglich doch nur eine allerdings wesentlich verbesserte Konstruktion der Newcomenschen Pumpmaschine hervor; die neue Maschine benötigte wohl weniger Brennmaterial, gestattete rascheres Spiel, war jedoch wie jene einfachwirkend; ebenso arbeitete sie mit Vollfüllung während des ganzen Hubes und übertrug den Kolbendruck mittelst Kette auf einen oscillierenden Balken beziehungsweise Balancier. Der Kondensator wurde gewöhnlich durch Einspritzung von kaltem Wasser kühl gehalten; Watt hinterließ jedoch auch ein Modell eines Oberflächenkondensators mit zahlreichen engen Röhren, welcher im Prinzip dem heute zumeist bei Schiffsmaschinen gebräuchlichen Kondensator vollkommen

entspricht. Wie aus Fig. 5 ersichtlich, benützte Watt ja bereits in diesem Versuchsapparat einen Oberflächenkondensator, um die Vorteile der gesonderten Kondensation zu demonstrieren.

Fig. 6 stellt eine Pumpmaschine Wattscher Anordnung dieser Entwicklungsperiode dar. Obwohl der Cylinder oben durch einen Deckel geschlossen ist und der Dampf auch über dem Kolben eingelassen wurde, so hatte diese Anordnung doch nur den Zweck, Kolben und Cylinder warm zu erhalten. Die Maschine blieb nach wie vor nur **einfachwirkend**; der über dem Kolben eintretende Dampf hatte im übrigen nur dieselbe Aufgabe zu erfüllen, welche bei Newcomens Maschine der Atmosphäre zufiel und es wurde lediglich nur der Raum unter dem Kolben mit dem Kondensator in Verbindung gebracht.

Die Maschine besaß drei Ventile und zwar das Dampfventil *a*, das Ausgleichventil *b* und das Ausströmventil *c*. Zu Beginn des Niederganges wurden die beiden Ventile *c* und *a* geöffnet, um durch die Verbindung mit dem Kondensator *C* unter dem Kolben Vakuum zu bilden und andererseits über demselben Dampf einströmen zu lassen. Zu Ende des Niederganges wurden Ventil *c* und *a* geschlossen, Ventil *b* geöffnet und damit die Verbindung, somit ein Druckausgleich zwischen dem Raume über und unter dem Kolben hergestellt; der Kolben wurde nun durch das Gewicht des Pumpengestänges *P* wieder in die obere Lage gebracht. Die Luftpumpe *A* förderte das Kondensat in das Reservoir *H*, aus welchem die Speisepumpe *F* den Wasserbedarf für den Kessel entnahm.

In einem einbegleitenden Schriftstücke zu dem Artikel „*Dampfmaschine*“ in Robisons *System of Mechanical Philosophy* (1822) gab Watt die nachfolgende Mitteilung der Experimente und Betrachtungen, welche seinem ersten Patente vorangingen. Diese Mitteilung ist von so außerordentlichem Interesse, daß die wörtliche Wiedergabe derselben keiner weiteren Entschuldigung bedarf.

„Meine Aufmerksamkeit wurde zum ersten Male im Jahre 1759, durch John Robison, zu jener Zeit Student an der Universität Glasgow, später Professor der Physik in Edinburg, auf die Dampfmaschine gelenkt. Robison kam auf die Idee, die Dampfkraft zur Fortbewegung von Straßenwagen, sowie für andere Zwecke auszunützen; allein diese Idee war nicht ausgereift und wurde daher, als Robison noch in demselben Jahre Glasgow verließ, bald verworfen.

„Um das Jahr 1761 oder 1762 versuchte ich einige Experimente über die Kraft des Dampfes unter Benützung eines Papinianischen Topfes als Kessel. Ich bildete mir eine Art Dampfmaschine, indem ich auf demselben eine kleine Spritze oder Heberöhre von $\frac{1}{8}$ Zoll Diameter be-

festigte, mit einem soliden Kolben und einem Hahn, um die Röhre mit dem Topfe nach Belieben in oder außer Verbindung setzen oder den Dampf aus derselben in die Atmosphäre leiten zu können. Sobald die Verbindung zwischen dem Topfe und der Spritze geöffnet war, strömte Dampf in diese über und hob vermöge seiner Wirkung auf den Kolben ein ziemlich bedeutendes Gewicht (15 Pfund), mit welchem der Kolben belastet war.

„Wenn das Gewicht seine Höhenlage erreicht hatte, wurde die Verbindung mit dem Topf geschlossen und jene mit der Atmosphäre geöffnet; der Dampf entwich ins Freie und das Gewicht kehrte in seine anfängliche Lage zurück. Diese Operationen wurden wiederholt, und obgleich bei diesen Experimenten der Hahn von Hand aus gestellt wurde, so ergab sich doch die Möglichkeit, denselben durch die Maschine selbst mit größter Regelmäßigkeit zu steuern. Die Idee, eine Maschine nach diesem Prinzip zu bauen, gab ich jedoch bald darnach auf, weil ich einsah, daß dieselbe an denselben Mängeln leiden würde wie Saverys Maschine, als: die stete Gefahr, den Dampfkessel zu sprengen; die Schwierigkeit, in anbetracht des höheren Druckes dichte Verbindungen zu erlangen; die großen Dampfverluste infolge des Umstandes, daß für den Niedergang des Kolbens kein den Überdruck erhöhendes Vakuum zur Verfügung steht etc. (Ich beschrieb trotzdem diese Maschine im vierten Artikel der Spezifikation zu meinem

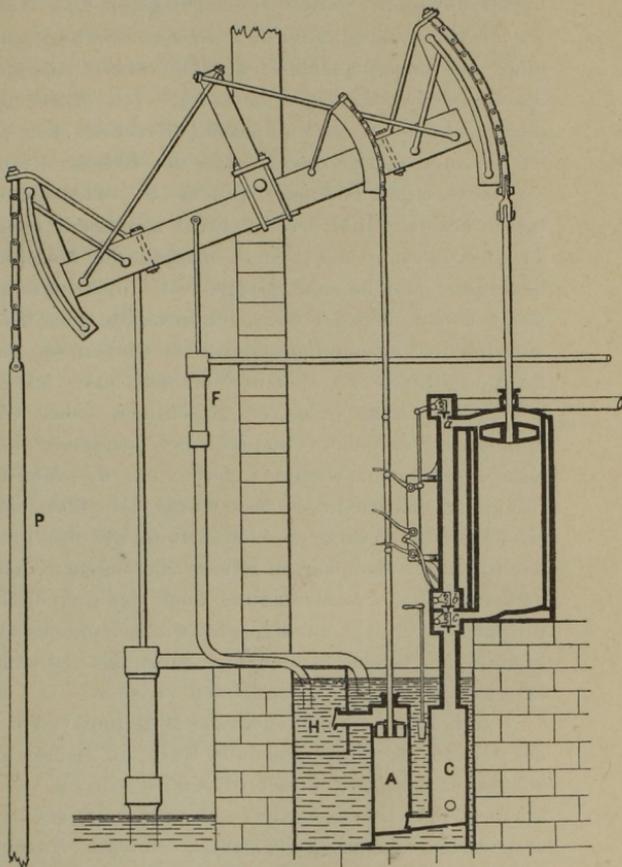


Fig. 6. Watts einfachwirkende Maschine, 1769.

bauen, gab ich jedoch bald darnach auf, weil ich einsah, daß dieselbe an denselben Mängeln leiden würde wie Saverys Maschine, als: die stete Gefahr, den Dampfkessel zu sprengen; die Schwierigkeit, in anbetracht des höheren Druckes dichte Verbindungen zu erlangen; die großen Dampfverluste infolge des Umstandes, daß für den Niedergang des Kolbens kein den Überdruck erhöhendes Vakuum zur Verfügung steht etc. (Ich beschrieb trotzdem diese Maschine im vierten Artikel der Spezifikation zu meinem

Patente vom Jahre 1769; ebenso in der Spezifikation eines andern Patentes vom Jahre 1784 zugleich mit einer Methode der Verwendung desselben für Straßenfahrzeuge.)

„Die Leitung meiner Geschäfte verhinderte mich für einige Zeit, dieses Problem weiter zu verfolgen. Im Winter 1763—64 hatte ich jedoch Gelegenheit, anlässlich der mir übertragenen Reparatur eines Modelles einer Newcomenmaschine der Universität Glasgow, mich neuerdings mit diesem Gegenstande zu befassen. Ich führte die Reparatur mechanisch durch; als ich nach Vollendung derselben den Apparat ausprobierte, fand ich zu meinem Erstaunen, daß der Kessel, obwohl scheinbar groß genug (er hatte einen Diameter von ca. 9", während der Cylinder nur 2" Diameter bei 6" Hub besaß), nicht genügend Dampf zu liefern vermochte. Trotz Anblasens des Feuers machte die Maschine nur wenige Hübe und benötigte eine enorme Menge von Injektionswasser, obwohl die Pumpe nur schwach belastet war. Ich erkannte sehr bald, daß die Ursache dieser auffallenden Erscheinung darin zu suchen sei, daß dieser kleine Cylinder im Verhältnisse zu seinem Volumen eine viel größere Oberfläche besitze als die Cylinder größerer Maschinen. Die weiteren Versuche ergaben nun auch, daß bei entsprechend geringerer Belastung der Pumpe der Kessel genügend Dampf lieferte, um das Maschinchen in regelmäßigem Gange zu erhalten. Ferner wurde mir klar, daß der Metalleylinder des Modelles die Wärme rascher leitete als die gußeisernen, im Innern gewöhnlich mit einer harten Kruste überzogenen Cylinder größerer Maschinen; daß somit eine Verbesserung auch dadurch erzielt werden könnte, wenn für den Cylinder ein schlecht wärmeleitendes Metall verwendet werden könnte; als solches schien mir Holz, falls es sich als genügend dauerhaft erweisen sollte, am geeignetsten zu sein.

„Ich baute nun eine kleine Maschine von 6" Diameter und 12" Hub des Cylinders; dieser war aus Holz, in Leinöl getränkt und vollkommen ausgetrocknet. Mit dieser Maschine wurden viele Versuche durchgeführt, allein der Cylinder erwies sich gar bald als nicht genügend dauerhaft; andererseits überstieg der Dampfverbrauch trotzdem wesentlich jenen Wert, welcher nach den Angaben Desaguliers bei großen Maschinen konstatiert wurde. Es zeigte sich auch, daß alle Versuche, eine bessere Saugwirkung durch Erhöhung der Injektionswassermenge zu erzielen, nur einen unverhältnismäßig größeren Dampfverbrauch zur Folge hatten. Als Ursache dieser Erscheinung konnte die kürzlich von Dr. Cullen und einigen andern Philosophen gemachte Entdeckung angenommen werden, daß Wasser von niedriger Temperatur, unter 100° F., im Vakuum zu sieden beginnt, daher bei höherer Temperatur im Cylinder Dampf erzeugt, dessen Spannung den Druck der Atmosphäre auf den Kolben teilweise aufheben würde.

„Die Experimente, welche ich nun durchführte, um die Temperaturen zu ermitteln, bei welchen Wasser unter verschiedenen über der Atmosphäre liegenden Pressungen siedet, ergaben, daß bei Temperatursteigerungen nach arithmetischen Reihen die Spannungen nach geometrischen Reihen zunehmen und umgekehrt; durch graphische Darstellung dieser Resultate erhielt ich sodann jene Werte, welche meinem Zwecke entsprachen. Ferner ergaben die Versuche, daß ein gutes Vakuum große Wassermengen erfordert; diese kühlen jedoch den Cylinder so stark ab, daß zu seiner abermaligen Erwärmung wieder so große Dampfmengen erforderlich sind, welche außer Verhältnis stehen zu dem Arbeitsgewinn in Folge des besseren Vakuums, und daß somit die alten Mechaniker weise gehandelt hatten, indem sie sich mit Spannungen von 6—7 Pfund pro Quadratzoll (ca. 0,42 bis 0,49 Atmosphären) Überdruck begnügten.

„Es war somit erwiesen, daß Dr. Desaguliers Beurteilung der Experimente Beigtons über die Masse des Dampfes auf einem groben Fehler beruhte. Ich nahm eine Florentiner Flasche, welche ein Pfund Wasser zu fassen vermochte und füllte in dieselbe ungefähr eine Unze ($\frac{1}{16}$ Pfund) destillierten Wassers; in die Öffnung der Flasche steckte ich eine Glasröhre, die nahe bis zum Wasserspiegel reichte und dichtete dieselbe mit einem in Glaserkitt gehüllten Bindfaden ab. Das Ganze setzte ich dann in einem Zinnofen vor ein Feuer, bis das Wasser vollständig verdampft war, was ungefähr eine Stunde beanspruchte, da ich die Erwärmung nicht wesentlich höher trieb als bis zur Siedetemperatur des Wassers. Nachdem die Luft in der Flasche schwerer war als der Dampf, sammelte sich dieser oben an und trieb die Luft durch die Röhre heraus.

„Sobald alles Wasser verdampft war, wurde der Ofen mit der Flasche vom Feuer entfernt und ein Strahl kalter Luft gegen eine Seite der Flasche geblasen, um den in der Flasche zurückgebliebenen kondensierten Dampf an einer Stelle zu sammeln. Nachdem alles kalt war, wurde das Rohr herausgenommen, die Flasche samt Inhalt sorgfältig abgewogen. Die Flasche wurde hierauf wieder erhitzt und durch Ausblasen mittelst Blasbalg innen vollkommen getrocknet; die neuerliche Abwage ergab eine Gewichtsabnahme von ca. 4 grains (schätzungsweise $4\frac{1}{3}$ grains). Hierauf wurde die Flasche wieder mit Wasser vollkommen gefüllt und das Gewicht der Füllung mit $17\frac{1}{8}$ Unzen avoir du poids bestimmt. Diese Abwagen ergaben somit ungefähr 1800 für die Ausdehnung des Wassers verwandelt in Dampf von der Wärme kochenden Wassers.

„Dieses Experiment wurde wiederholt und ergab nahezu das gleiche Resultat. Um die Überzeugung zu gewinnen, daß die Flasche vollkommen mit Dampf gefüllt war, wurde eine gleiche Quantität Wasser zum dritten Male verdampft und hierauf die Flasche, solange sie noch warm war,

umgekehrt, also mit der Öffnung nach unten, in ein Gefäß mit Wasser getaucht; in dem Maße als die Flasche erkaltete, saugte sie Wasser an und war bei der Temperatur der Atmosphäre bis auf etwa $\frac{1}{2}$ Unze gefüllt. (In der Durchführung dieser Experimente wurde ich durch Dr. Black unterstützt. In Dr. Robisons Ausgabe von Dr. Blacks Vorlesungen, Vol. I, Seite 147, weist letzterer speziell auf einige von ihm über diesen Gegenstand durchgeführte Experimente hin; mir sind jedoch keine, außer den von mir selbst durchgeführten Experimenten in dieser Richtung bekannt.)

„Indem ich diese Experimente später wiederholte, vereinfachte ich den Apparat, indem ich das Rohr wegließ, die Flasche in den Ofen legte, also nicht aufrecht in denselben stellte, die Öffnung durch einen Kork mit seitlichem Einschnitt teilweise verschloß und im übrigen wie früher verfuhr.

„Ich betrachte diese Experimente nicht als besonders genau, denn einerseits war die mir zur Verfügung stehende Skala brauchbarer GröÙe nicht sehr empfindlich, andererseits wird die Dampfdichte durch die Wärme beeinflußt, welcher der Dampf ausgesetzt ist, welche jedoch in der beschriebenen Weise nicht leicht reguliert oder bestimmt werden konnte; bei meiner experimentellen Erfahrung schätze ich die Expansion eher noch weitergehend als ich berechnete*).

„Ein Kessel wurde konstruiert, welcher die in einer beliebigen Zeit verdampfte Wassermenge anzeigte und zugleich die Dampfmenge feststellte, welche bei jedem Maschinenhube verbraucht wurde; ich fand, daß diese Dampfmenge das Mehrfache des Hubvolumens betrug. Erstaunt über die große Wassermenge, welche für die Einspritzung erforderlich war und die bedeutende Erwärmung derselben durch die verhältnismäßig kleine Wassermenge, welche als Dampf zur Füllung des Cylinders pro Kolbenhub verbraucht wurde, und daher vermutend, daß irgend ein Irrtum oder Fehler unterlaufen sei, wurde nun das folgende Experiment versucht: Eine Glasröhre, rechtwinklig abgebogen, wurde mit dem horizontalen Schenkel in den Schnabel eines Theekessels eingeschoben, während der niederhängende Schenkel in einen mit Brunnenwasser gefüllten Glaszylinder eingetaucht wurde. Nun wurde Dampf aus dem Kessel so lange durch das Rohr geleitet, bis sich derselbe nicht mehr kondensierte und das

*) Da 1 cbm gesättigten Dampfes von atmosphärischer Spannung 0,5878 kg, 1 cbm Wasser von 4° C. 1000 kg wiegt, so beträgt die von Watt mit 1800 gefundene Zahl tatsächlich nur 1700. — In anbetracht der primitiven Vorrichtungen, deren sich Watt bedienen konnte und der Mangelhaftigkeit der Versuche selbst ist es erstaunlich, daß Watt trotzdem zu einem verhältnismäßig so günstigen Resultate gelangte.

Wasser in dem Glascylinder nahezu siedend heiß geworden war. Es ergab nun die Messung, daß die Wassermenge im Glasgefäße um ca. $\frac{1}{6}$ durch den kondensierten Dampf vermehrt wurde; daraus folgt, daß Wasser in Dampf verwandelt ca. das sechsfache seines Gewichtes an Brunnenwasser auf 212° F. (100° C.) beziehungsweise so lange erwärmen kann, bis es den Dampf nicht mehr kondensiert. Sehr erstaunt über diese eigentümliche Erscheinung, deren Ursache ich mir nicht erklären konnte, teilte ich dieselbe meinem Freunde Dr. Black mit, welcher mich nun über seine Lehre von der latenten Wärme, worüber er einige Zeit früher (Sommer 1764) Vorträge gehalten hatte, informierte; ich hatte damals, durch Geschäfte verhindert, keine Gelegenheit, diese Vorträge zu hören und würde denselben auch keine besondere Beachtung geschenkt haben, wenn ich nicht selbst über eine der Tatsachen gestrauchelt wäre, auf welche sich diese herrliche Theorie stützt.

„Durch weitere Betrachtungen gelangte ich zur Erkenntnis, daß es einerseits notwendig sei, um den Dampf möglichst auszunützen, den Cylinder stets so heiß wie den eintretenden Dampf zu erhalten, andererseits den Dampf selbst, respektive dessen Kondensat, sowie das Injektionswasser, wenn möglich auf 100° F. oder noch weiter abzukühlen. Anfänglich war es mir nicht klar, auf welche Weise und durch welche Mittel ich diese Bedingungen erfüllen könne. Anfang des Jahres 1765 kam ich jedoch auf folgenden Gedankengang: Wenn man einen mit Dampf gefüllten Cylinder in Verbindung setzt mit einem von Luft und anderen Flüssigkeiten entleerten Gefäße, dann wird der Dampf in dieses überströmen und zwar solange, bis der Gleichgewichtszustand hergestellt ist; kühlt man jedoch dieses Gefäß durch Injektion oder auf andere Weise fortwährend ab, dann wird immer mehr und mehr Dampf überströmen, bis sämtlicher Dampf kondensiert ist. Vorausgesetzt, die beiden Gefäße seien dampfleer, wie kann das Injektionswasser, die mitgeführte Luft und der kondensierte Dampf hinausgeschafft werden?

„Diese Aufgabe zu lösen, schien mir auf zwei Arten möglich. Eine Lösung dachte ich mir derart, daß mit dem zweiten Gefäß ein Abfallrohr verbunden wird, von mehr als 34 Fuß Länge, durch welches das Wasser herabsinkt (eine Wassersäule von dieser Höhe übersteigt die Atmosphäre), während die Luft durch eine Pumpe entfernt wird.

„Eine andere Lösung, welche in allen Fällen und namentlich dann anwendbar wäre, wenn kein Brunnen oder Wassertümpel zur Verfügung steht, besteht in der Verwendung einer oder mehrerer Pumpen, welche sowohl die Luft als auch das Wasser zu entfernen hätten.

„Der letzteren Methode gab ich den Vorzug und wendete dieselbe für die Folge auch ausschließlich an. Die Dichtung des Kolbens der

Newcomenmaschine mittelst Wasser war bei dieser neuen Anordnung jedoch nicht verwendbar, weil dieses über dem Kolben stehende Wasser einerseits beim Niedergange des Kolbens mit der heißen Cylinderwand in Berührung tretend verdampfen und diese abkühlen, andererseits durch Undichtheiten der Kolbenliederung in den teilweise entleerten und heißen Cylinder gelangend, im Cylinder verdampfen und die Bildung des Vakuums hindern würde.

„Ich dachte durch Anwendung von Wachs, Talg oder anderen Fetten diesem Übelstande der Wasserdichtung zu begegnen und damit zugleich den Kolben zu schmieren. Ferner erschien es mir unrationell, den Cylinder oben offen zu lassen, da derselbe durch die auf den Kolben wirkende Luft abgekühlt und somit der bei jeder Füllung eintretende Dampf teilweise kondensiert wird. Ich schlug daher vor, den Cylinder oben durch einen Deckel dampfdicht zu schließen, die Kolbenstange durch eine Stopfbüchse zu führen und nun über dem Kolben statt Luft Dampf eintreten und wirken zu lassen. (Die Führung der Kolbenstange durch die Stopfbüchse war neu in Dampfmaschinen; Newcomens Maschine besaß dieses Detail nicht, denn der Cylinder derselben war oben offen, die Kolbenstange quadratisch und sehr plump. Die Befestigung der Kolbenstange mit dem Kolben durch einen Konus war gleichfalls eine meiner späteren Verbesserungen um das Jahr 1774.) Trotz dieser konstruktiven Vervollkommnungen verblieb noch immer eine andere Quelle steter Dampfverluste durch die fortwährende Abkühlung des Cylinders an der Außenluft, welche zur Folge hatte, daß der bei jedem Hub eintretende Dampf sich an der kälteren Cylinderwand kondensierte. Diesem Übelstande suchte ich durch die Anbringung eines äußeren dampfführenden Cylinders (Dampfmantel), welcher von einem Cylinder aus Holz oder irgend einer schlecht wärmeleitenden Substanz umgeben ist, erfolgreich zu begegnen.

„Nachdem ich einmal die Idee der getrennten Kondensation gefaßt hatte, kamen mir die übrigen Verbesserungen in rascher Reihenfolge in den Sinn, so daß ich im Verlaufe einiger Tage das vollständige Problem der neuen Maschine ausgedacht hatte und nun ohne Verzögerung an die praktische Durchführbarkeit desselben im Wege des Experimentes schreiten konnte. Ich nahm eine große Heberöhre von $1\frac{3}{4}$ Zoll Diameter und 10 Zoll Länge, versah dieselbe an beiden Enden mit Deckeln aus Zinnblech und mit einer Röhre, um Dampf aus einem Kessel zu beiden Seiten derselben einführen zu können, sowie mit einem andern Rohre, welches das obere Ende des Cylinders mit dem Kondensator in Verbindung setzte. (Um den Apparat möglichst einfach zu gestalten, wendete ich den Cylinder, d. h. ich stellte denselben verkehrt auf.) Durch die Kolbenstange bohrte ich der Länge nach ein Loch und brachte am untern Ende derselben ein

Ventil an, damit das Wasser, welches sich bei den ersten Füllungen des Cylinders in Folge Kondensation des Dampfes ansammelte, entfernt werden konnte. Der Kondensator bestand aus zwei vertikalen Röhren aus dünnem Zinnblech, 10—12 Zoll lang, von ungefähr $\frac{1}{6}$ Zoll Durchmesser, oben verbunden durch ein kurzes horizontales Rohr von großem Durchmesser mit einem Ansatz an der obern Seite, durch ein Ventil geschlossen, welches nach oben öffnete. Diese Röhren waren außerdem am untern Ende mit einem andern Vertikalrohr von ungefähr 1 Zoll Durchmesser, welches als Luft- und Wasserpumpe diente, verbunden. Diese Pumpe als auch die Kondensatorröhre wurden in ein schmales Gefäß gestellt, welches mit kaltem Wasser gefüllt war. (Diese Konstruktion des Kondensators wählte ich aus dem Grunde, weil mir einerseits bekannt war, daß dünne Metallplatten die Wärme vorzüglich leiten und weil ich andererseits von der Voraussetzung ausging, daß nur der kondensierte Dampf sowie die Luft, welche mit dem Dampfe oder durch Undichtheiten in den Kondensator gelangten, aus demselben zu entfernen sind, sobald die Kondensation ohne Injektion erfolgt.)

„Das Dampfrohr wurde mit einem kleinen Kessel in Verbindung gebracht. Als sich genügend Dampf entwickelt hatte, wurde dieser in den Cylinder eingelassen und trat bald darauf aus der Bohrung der Kolbenstange sowie dem Kondensatorventile aus. Sobald man annehmen konnte, daß die Luft aus dem Kondensator verdrängt sei, wurde der Dampfahn geschlossen und der Luftpumpenkolben in die Höhe gezogen; darauf bildete sich in den schmalen Kondensatorröhren bereits ein Vakuum und der eintretende Dampf kondensierte. Der Dampfkolben stieg sofort in die Höhe und hob ein Gewicht von ca. 18 Pfund, welches am untern Ende der Kolbenstange angehängt war. Nun wurde der Auslaßahn des Cylinders geschlossen, die Verbindung mit dem Kessel geöffnet und die verbrauchte Dampfmenge sowie das gehobene Gewicht gemessen; dies Spiel wurde des öfteren wiederholt. Es ergab sich daraus, daß mit Ausnahme des Dampfmantels und der äußeren wärmedichtenden Hülle, die Erfindung, soweit die angestrebte Verminderung des Dampf- und Brennmaterialverbrauchs in Betracht kam, komplet war.

„Ein großes Modell mit Dampfmantel und Holzverschalung wurde nun sofort ausgeführt; die damit durchgeführten Experimente bestätigten meine Erwartungen und ließen die Vorteile meiner Erfindung nun außer Zweifel erscheinen. Es erwies sich später als zweckmäßig, den Röhrenkondensator durch ein leeres Gefäß, meist von cylindrischer Form und Wassereinspritzung zu ersetzen; nachdem bei dieser Anordnung mehr Wasser und Luft herauszufördern war, mußte die Luftpumpe entsprechend vergrößert werden. Diese Abänderung war durch den Umstand bedingt,

daß der Röhrenkondensator in anbetracht der für große Maschinen erforderlichen bedeutenden Abkühlungsfläche viel Raum in Anspruch nahm und selbst sehr voluminös wurde; andererseits bei unreinem Wasser die dünnwandigen Röhren außen verkrustet und somit schlecht wärmeleitend werden. Die Maschinen wurden mit nach oben arbeitendem Dampfzylinder, Balancier, und den übrigen Einrichtungen der älteren Maschinen gebaut. Die Umkehrung des Cylinders in dem früher beschriebenen Modell wurde für dasselbe nur gewählt, um die Versuche rascher durchführen zu können; gegen diese Anordnung erhoben sich jedoch bei großen Maschinen Bedenken aller Art.“

Die erste Maschine nach Watts System wurde für die berühmte Eisengießerei von John Wilkinson in Bersham zum Betriebe von Blasbälgen gebaut und 1776 in Gebrauch genommen. Je näher dieser Zeitpunkt heranrückte, desto ängstlicher wurde Watt, da von der Leistung dieser Maschine sehr viel für ihn abhing. Die Maschine wurde aus diesem Grunde mit außerordentlicher Sorgfalt ausgeführt; diese wurde belohnt, denn die Maschine erregte die Bewunderung aller, die Gelegenheit hatten, sie zu sehen und gar bald wurde der Ruhm der Firma Boulton & Watt in ganz Mittelengland bekannt. Rasch verbreitete sich nun der Ruf der neuen Dampfmaschine über die ganze zivilisierte Welt; es fehlte dem jungen Unternehmen nicht an Bestellungen, aber auch nicht an Fabrikationsschwierigkeiten aller Art, die zu überwinden waren.

1777 lieferte die genannte Firma die erste Dampfmaschine in die an Bergbau reiche Grafschaft Cornwall; Watt leitete selbst die Aufstellung; die Maschine arbeitete äußerst befriedigend und fast geräuschlos. Im Juni 1778 waren bereits 7 von 10 nach Cornwall bestellten Maschinen fertig, trotzdem mußte Watt überall Klagen und Vorwürfe wegen zu langsamer Lieferung und Aufstellung hinnehmen. Bis zum Sommer 1780 waren bereits 40 Pumpmaschinen verkauft, die Hälfte derselben nach Cornwall. Die durchschlagenden Erfolge, welche Watt mit seiner Maschine erzielte, erregten Neid und Gehässigkeit und es wurden, namentlich in Cornwall, Bewegungen geschürt, um das Patent, welches bis zum Jahre 1800 verlängert wurde, zu stürzen; man stützte sich darauf, daß die Dampfmaschine für den Bergbau unentbehrlich sei und daher das allgemeine Wohl die Aufhebung des Patentes erheische. Eine diesbezügliche Petition beim Parlamente unterblieb allerdings wegen ihrer Aussichtslosigkeit, allein es wurden nun erhöhte Anstrengungen gemacht, das Patent zu umgehen.

1781 machte sich Watt ernstlich daran, die schon früher gefaßte

Idee, durch die Dampfmaschine eine rotierende Bewegung zu erzeugen, um sie für den Betrieb von Mühlen und anderen Maschinerien dieser Arbeitsweise geeignet zu machen, weiter zu verfolgen.

In einem zweiten Patente (1781) beschreibt Watt die „Sonne und Planet“-Räder und andere Methoden, um aus der geradlinigen Bewegung des Kolbens die rotierende Bewegung einer mit Schwungrad versehenen Welle abzuleiten. Er beabsichtigte für diesen Zweck Kurbel und Kurbelstange zu benützen, ein Detail, welches bereits zu jener Zeit bei den gewöhnlichen Tret Drehbänken benützt wurde; aus diesem Grunde hielt Watt die Anwendung von Kurbel und Pleuelstange zur Erzeugung der rotierenden Bewegung nicht für patentfähig. Inzwischen hatte jedoch ein Knopfdreher namens James Pickard aus Birmingham, wahrscheinlich durch einen Arbeiter der Firma Boulton & Watt dazu aufgemuntert, ein Patent auf die Anwendung der Kurbel bei Dampfmaschinen genommen (23. August 1780). Watt bereitete dies anfänglich Schwierigkeiten, doch fand er bald andere Mittel, denselben Zweck zu erreichen. Statt mit Pickard ein Übereinkommen zu treffen, benützte er nunmehr das sogenannte „Planetenrad“ (wahrscheinlich eine Erfindung William Murdocks, des ersten Monteurs der Firma Boulton & Watt, welcher auch später die Gasbeleuchtung erfand) und zwar solange, bis das Patent Pickards abgelaufen war. Während die frühere Bauart der Maschine nur für Pumpzwecke Verwendung finden konnte, eröffnete sich nun der Dampfmaschine ein un-
gemein ausgedehntes Verwendungsgebiet.

Die Maschine wurde bisher ausschließlich nur einfachwirkend gebaut; die Schubstange bildete die Verbindung mit dem Balancier; das am andern Hebelarm befestigte Gegengewicht hob den Kolben an, sobald Dampf unter demselben eingelassen wurde. 1782 patentierte Watt jedoch zwei weitere Verbesserungen von Bedeutung, welche er schon einige Jahre vorher ersonnen hatte. Die eine Verbesserung bestand in der Einführung des Dampfes, beziehungsweise in der Benützung des Vakuums zu beiden Seiten des Kolbens, also in der **Doppelwirkung** der Maschine; die andere Verbesserung, welche bereits 1769 von Watt ersonnen wurde, in der Benützung der Dampfexpansion, also in der nur teilweisen Füllung des Cylinders mit Frischdampf, so daß der Rest des Kolbenhubes nach Abschluß des Dampfzutrittes unter der Expansionswirkung des Dampfes erfolgte. Da bei der Doppelwirkung der Maschine der Balancier gehoben und herabgezogen werden mußte, wendete Watt zur Verbindung des Balanciers mit der Kolbenstange seine Parallelbewegung, das sogenannte **Wattsche Parallelogramm**, an, wodurch auch gleichzeitig eine nahezu geradlinige Führung der Kolbenstange erreicht wurde. Außerdem wendete Watt das Drosselventil zur Regulierung der Dampfzufuhr, sowie den

Centrifugalregulator, ein konisches Doppelpendel, auf das Drosselventil wirkend, zur Regelung der Geschwindigkeit der Maschine an.

Die Entwicklung, welche die Dampfmaschine bis zu jener Zeit erreicht hatte, ist aus Fig. 7 (aus Stuarts *Geschichte der Dampfmaschine*) ersichtlich; *pp* zeigt die Parallelbewegung, *g* den Regulator; außerdem sieht man das Drosselventil und je ein Ein- und Ausblasventil an jedem Ende des Dampfeylinders.

Während Watts Geschäftsteilnehmer Mathew Boulton auf Fertigstellung von Dampfmaschinen mit rotierender Bewegung drang, zweifelte Watt, daß daraus ein Geschäftsvorteil erwachsen werde. Gegen Ende 1782 wurde jedoch die erste Maschine dieser Art zum Betriebe einer Kornmühle in Gang gesetzt. In London wurde die erste Kurbelmaschine in der Brauerei von Goodwyn & Co. aufgestellt; diesem Beispiele folgten bald die übrigen Brauereien Londons und in kurzer Zeit folgten Bestellungen für die verschiedensten Betriebe, selbst nach Amerika und Westindien. Es liefen so viele Bestellungen ein, daß sich Watt veranlaßt sah, an seinen Teilnehmer zu schreiben: „Ich sehe, daß jede Maschine mit rotierender Bewegung doppelt so viel Arbeit verursacht, als eine Pumpenmaschine und im allgemeinen nur halb so viel Geld einbringt; deshalb bitte ich Sie, vorläufig keine weiteren Bestellungen auf rotierende Maschinen anzunehmen.“

Unter anderen Erfindungen Watts sei auch hier im Anschlusse der „Indikator“ genannt, welcher bekanntlich den Zusammenhang der Dampfspannung im Cylinder und der Bewegung des Kolbens graphisch darstellt. Watt bewahrte diese Erfindung bis an sein Lebensende als Geheimnis und sicherte sich dadurch auch jene Überlegenheit über seine Zeitgenossen hinsichtlich des Ausbaues der Dampfmaschine, die ja genügend bekannt ist. Wenn ihm dieses Instrument gefehlt hätte, würde die Dampfmaschine kaum in solcher Vollendung aus seinen Händen hervorgegangen sein. Watt vervollkommnete auch dieses Instrument so weit, daß es lange Jahre nach ihm keiner wesentlichen Verbesserungen bedurfte.

Watt erfand auch einen Dampfhammer, sowie eine Dampflokomotive für gewöhnliche Straßen, aber diese Erfindungen wurden von ihm nicht weiter verfolgt. Als Erfinder wurde Watt durch seinen Assistenten Murdoch wirksam unterstützt; manche Verbesserungen und neue Ideen verdankte Watt seinem findigen Mitarbeiter, so unter anderem die Einführung des Flachschiebers als ein Mittel, Dampf ein- und Austritt zu steuern.

Obwohl Watt die Vorteile der partiellen Füllung beziehungsweise Expansion des Dampfes kannte, so wendete er trotzdem nur niedrige Spannungen, selten mehr als 7 Pfund pro Quadratzoll (ca. $\frac{1}{2}$ Atm. Überdruck) an. Die Kessel wurden, gleich jenen Newcomens, durch ein

nach oben offenes Rohr gespeist, dessen Höhe mindestens gleich sein mußte jener Wassersäule, welche durch die Dampfspannung des Kessels im Gleichgewicht erhalten wurde.

Dem Beispiele Saverys folgend adoptierte Watt zur Bezeichnung der Größe resp. Leistung seiner Dampfmaschine die Einheit „horse power“ (Pferdekraft) und bezeichnete damit jene Leistung, welche durch das Anheben von 33 000 Pfund (14 969 kg) auf eine Höhe von 1 Fuß (0,3048 m) in einer Minute verrichtet wird (76,04 kgm pro Sekunde). Dieses Maß wurde auf Grund der Versuche über die Leistung eines Pferdes angenommen; ein mittelstarkes Pferd ist wohl nicht imstande dauernd mit solcher Belastung zu arbeiten; Watt wählte jedoch absichtlich diese Überbelastung als Einheit, um seinen Kunden keine Veranlassung zur Klage in dieser Beziehung zu geben.

Wie aus der an früherer Stelle angeführten Spezifikation zur ersten Patentschrift Watts, Punkt 4, hervorgeht, beschäftigte sich Watt bereits zu jener

Zeit mit dem Problem der Auspuffmaschine ohne Kondensation, welche Maschine hinsichtlich der Dampfspannung wesentlich höhere Anforderungen stellte, als die Kondensationsmaschine. Wie aus Watts Mitteilungen hervorgeht, führte er auch nach dieser Richtung Experimente durch, bevor er den getrennten Kondensator ersonnen hatte; er verfolgte jedoch dieses Problem nicht weiter, vielleicht auch aus dem Grunde, weil

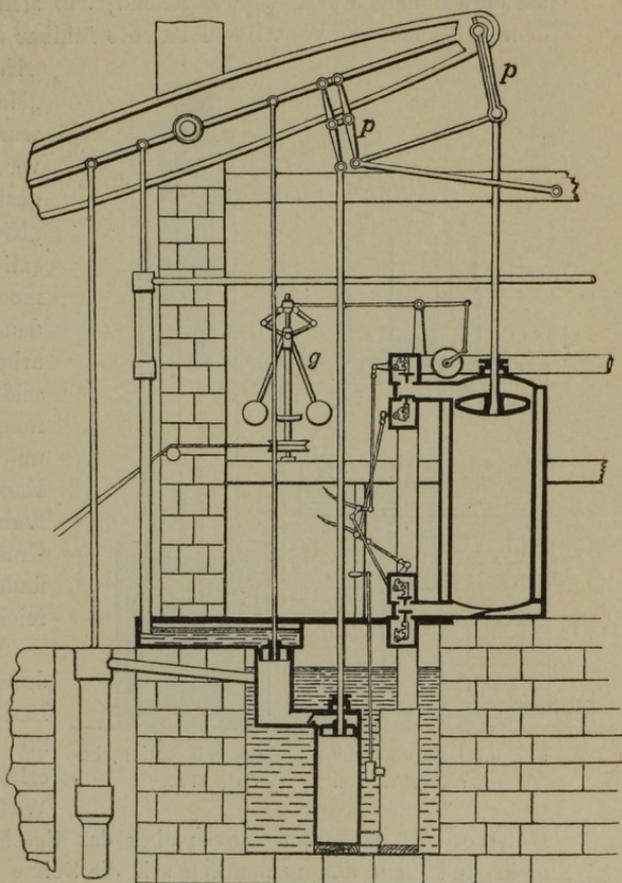


Fig. 7. Watts doppelwirkende Maschine, 1782.

bereits 1725 eine Maschine ohne Kondensation von Leupold in dessen „*Theatrum Machinarum*“ beschrieben war.

Leupolds Maschine zeigt Figur 8, aus welcher sich die Wirkungsweise derselben genügend klar ergibt. Watts Abneigung gegen hohe Spannungen und der Einfluß derselben auf die ganze Praxis des Dampfmaschinenbaues waren so weitgehend, daß sich dieser Einfluß auch nach dem Erlöschen der Watt'schen Patente fühlbar machte. Die Bezeichnungen

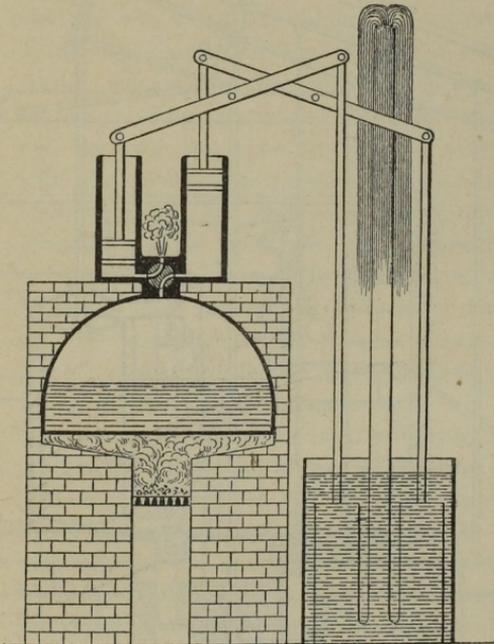


Fig. 8. Dampfmaschine ohne Kondensation, beschrieben von Leupold, 1725.

„Hochdruckmaschine“ und „Maschine ohne Kondensation“ wurden von Watt als sinnverwandt in vollen Gegensatz gestellt zu der Bezeichnung „Niederdruck- oder Kondensationsmaschine“. Diese Nomenclatur konnte sich nicht dauernd halten; heutzutage arbeiten Kondensationsmaschinen mit denselben Spannungen wie Auspuffmaschinen und nützen die Expansion des Dampfes, diese geniale Erfindung Watts, bis zu einem Grade aus, welcher zu des Erfinders Zeit unmöglich zu erreichen war.

Watts Patent, welches durch einen speziellen Akt des Parlamentes auf die Dauer von 25 Jahren ausgedehnt war, erlosch im Jahre 1800, als Watt 64 und sein Partner

Boulton 72 Jahre alt waren; aber das Geschäft dehnte sich trotzdem mehr und mehr aus, namentlich seit die Söhne beider 1794 als Teilhaber in die Firma eingetreten waren, neues Leben und neue Kraft dem Geschäfte zuführend. Die Firma Boulton & Watt vermochte noch lange Zeit ihre Überlegenheit über Konkurrenten zu behaupten. Boulton starb am 17. August 1809 im Alter von 81 Jahren; der stets schwächliche Watt überlebte ihn um 10 Jahre; seine Gesundheit befestigte sich merkwürdigerweise in seinem Alter; sein Wissensdurst blieb ungeschwächt, ebenso wie sein Erfindungsgeist; die letzte Erfindung, die ihn beschäftigte, war eine Maschine zum Kopieren, Vergrößern und Verkleinern von

Statuen und Medaillen; er arbeitete ca. 8 Jahre daran und hatte dann noch als 83-jähriger Greis das Vergnügen, seinen Freunden Produkte seiner neuen Maschine zum Geschenke machen zu können. Ein Jahr darauf, im Sommer 1819 wurde Watt von seiner letzten Krankheit befallen und verschied am 19. August 1819 in seinem Landhause zu Birmingham.

Um das Jahr 1800 wurden in England durch **Trevithick** und in Amerika durch **Oliver Evans** die ersten mit Dampf von verhältnismäßig hoher Spannung arbeitenden **Maschinen ohne Kondensation** eingeführt. Sowohl Evans als Trevithick verwendeten ihre Maschinen zum Antrieb von Straßenwagen und beide benützten cylindrische Kessel mit einem innern cylindrischen Feuerrohr, welche Anordnung als Cornwalkessel bekannt ist. Im Verein mit Bull, einem früheren Arbeiter der Firma Boulton & Watt, baute Trevithick vorher direktwirkende Pumpenmaschinen, deren Dampfzylinder bei umgekehrter Aufstellung desselben über die Pumpe zu stehen kam, wodurch der Balancier der früheren Bauarten überflüssig wurde. Bei diesen „**Bullmaschinen**“, wie man sie nannte, wurde der Dampf durch Einspritzung kalten Wassers in das Ausströmröhr kondensiert, welche Anordnung jedoch von Boulton & Watt als ein Eingriff in ihr Patent mit Erfolg angefochten wurde.

Trevithick gebürt das Verdienst, der erste gewesen zu sein, welcher einen auf Schienen laufenden Dampfswagen benützte; er baute 1804 eine Lokomotive im modernen Sinne, welche auf einem Pferdebahngleise in Wales lief und es ist bemerkenswert, daß bei dieser Maschine der verbrauchte Dampf zur Erzeugung künstlichen Zuges in den Schornstein geleitet wurde, eine Erfindung, welche 25 Jahre später durch Georg Stephenson in so fruchtbringender Weise ausgenützt wurde. Im Zusammenhang hiermit sei erwähnt, daß bereits im Jahre 1769 von Cugnot in Frankreich ein Dampfstraßenwagen gebaut wurde, welcher zwei einfachwirkende Hochdruckzylinder dazu benützte, eine Triebachse durch Vermittlung von Sperrrad und Sperrkegel, also so zu sagen schrittweise anzutreiben. Evans gebürt die Anerkennung, Dampf von höherer Spannung in den Vereinigten Staaten Amerikas eingeführt und zur Geltung gebracht zu haben, wodurch sich die amerikanische Praxis durch viele Jahre vor jener Englands auszeichnete.

Unter den Zeitgenossen Watts verdient ein Mann namens Hornblower besonderer Erwähnung. **Jonathan Hornblower**, welcher in den Werkstätten der Firma Boulton & Watt herangebildet und mit Watt befreundet war, konstruierte und patentierte 1781 eine Maschine mit zwei

Cylindern ungleicher Größe, also nach unsern Begriffen eine **Compoundmaschine**. Der Dampf wurde zuerst in den kleinen Cylinder geleitet, um von diesem in den großen Cylinder überzutreten, Arbeit auf beide Kolben übertragend. Die beiden Cylinder waren parallel nebeneinander gelagert; die Kolbenstangen griffen an demselben Ende eines darüberliegenden Balanciers an. Hornblowers Maschine war somit dem Wesen nach eine Expansionsmaschine; die Benützung expandierenden Dampfes wurde daher von Hornblower früher patentiert als von Watt (1782), von diesem jedoch viel früher erfunden (1769); das Patent Hornblowers konnte daher nicht angefochten werden. Die Firma Boulton & Watt klagte jedoch Hornblower wegen Verletzung ihres Patenten infolge Benützung des Kondensators und der Luftpumpe und sperrte damit Hornblower den Bau von Dampfmaschinen.

Erst nach Erlöschen des Wattschen Patenten im Jahre 1800 wurde die Compoundmaschine von **Woolf** wieder aufgegriffen, mit dessen Namen sie seither eng verknüpft ist. Woolf verwendete Dampf von ziemlich hoher Spannung, füllte den kleinen Cylinder nur zum Teile und erreichte dadurch eine 6—9fache Expansion. Vom mechanischen Standpunkte aus betrachtet, hat die Zweicylindercompoundmaschine im Vergleiche mit einer Maschine, in welcher dieselbe Expansionsarbeit in nur einem Cylinder geleistet wird, den Vorteil, daß der von beiden Kolben der Compoundmaschine ausgeübte Druck weniger veränderlich ist als der auf den Kolben ausgeübte Druck der Eincylindermaschine. Dieser Vorteil war Hornblower und Woolf voraussichtlich bekannt. Ein anderer viel wichtigerer Vorteil dieses Systems liegt jedoch darin, daß infolge der Aufteilung der Expansion auf zwei Cylinder, diese einer viel geringeren Temperaturveränderung unterworfen sind als der Cylinder einer Einfachexpansionsmaschine bei gleich weitgehender Expansion. Dieser Vorteil war weder den Genannten, noch für viele Jahre hinaus den Erbauern und Benützern von Compoundmaschinen bekannt. Diese Tatsache, welche in einem spätern Kapitel eingehender behandelt werden soll, verringert bis zu einem gewissen Grade eine unvermeidliche Quelle steter Wärmeverluste aller Dampfmaschinen, darin liegend, daß die metallischen Cylinderwandungen durch die abwechselnde Berührung mit heißem und wieder abgekühltem Dampfe gleichfalls fortwährend erhitzt und abgekühlt werden. Das Compoundsystem ist daher derzeit nahezu bei allen großen Dampfmaschinen, welche Anspruch auf Ökonomie erheben, benützt.

Die Einführung der mehrstufigen Expansion ist auch die einzige von durchschlagendem Erfolge begleitete Vervollkommnung, welche die Dampfmaschine seit Watts Zeit erfuhr; die Erfahrung hat gelehrt, wie klar Watt das Wesen der Dampfmaschine erkannte, als er in

der Spezifikation zu seinem ersten Patente vom Jahre 1769 die Bedingung aufstellte, daß der Cylinder so heiß erhalten werden soll wie der eintretende Dampf.

Woolf führte die Compoundmaschine um das Jahr 1814 als Pumpmaschine auf den Kohlengruben in Cornwall ein. Die Maschine begegnete jedoch dort harter Konkurrenz durch die mit hoher Spannung arbeitende Eincylinderkondensationsmaschine, welche sich inzwischen in den Händen von Trevithick und andern Konstrukteuren in eine sehr leistungsfähige Maschine entwickelt hatte und der Woolfmaschine gegenüber den nicht zu unterschätzenden Vorteil der verhältnismäßig großen baulichen Einfachheit besaß. Woolfs Maschine fand daher wenig Anwert, während die Eincylindermaschine dem speziellen Zweck als Pumpe angepaßt, unter dem Namen „Cornish- oder Cornwallpumpmaschine“ durch viele Jahre infolge der Ökonomie ihres Betriebes berühmt war.

Der Dampfeylinder dieser Maschine, als Balanciermaschine gebaut, stand unter dem einen Ende des Balanciers, während von dem andern Ende eine schwere Stange herabhing, welche die tiefstehende Pumpe betätigte. Der Dampf wurde über dem Kolben während eines Teiles des Hubes eingeleitet und expandierte bis Ende des Hubes; durch den Dampfdruck wurde das Pumpengestänge gehoben. Durch ein Ausgleichventil wurde der Raum über und unter dem Kolben in Verbindung gesetzt, wie aus der früheren Figur 6 ersichtlich; infolge des Druckausgleiches ging das Gestänge vermöge seines Gewichtes in der Pumpe arbeitverrichtend herab und hob den Dampfkolben in seine Anlaßstellung.

Die großen Massen, welche bei jedem Hube in Bewegung gesetzt und wieder zur Ruhe gebracht werden mußten, wirkten vermöge ihrer Energie ausgleichend auf die großen Druckdifferenzen zufolge der Expansionsarbeit des Dampfes; das ganze schwere Maschinengestänge diente als Reservoir zur Aufspeicherung der überschüssigen Energie während der Admissionsperiode, um diese während und namentlich gegen Ende der Expansionsperiode wieder abzugeben. Die Hubzahl wurde durch einen Mechanismus, „Katarakt“ genannt, kontrolliert. Derselbe besteht dem Wesen nach aus einer kleinen Plungerpumpe, deren Kolben von der Maschine bei jedem Hube gehoben, dessen Niedergangsgeschwindigkeit jedoch unabhängig von der Maschinengeschwindigkeit automatisch geregelt wird; der rascher oder langsamer niedersinkende Plunger steuert durch Knaggen, Fallriegel oder ähnliche Vorrichtungen die Ein- und Ausströmventile und damit den Gang der Maschine selbst. Das Spiel des Kataraktes wird in der Weise geregelt, daß der Plunger desselben beim Aufgang Flüssigkeit (Öl, Glycerin) saugt und diese beim Nieder-

gange verdrängt; der Austritt der Flüssigkeit wird durch eine von Hand aus stellbare Öffnung geregelt und damit die Niedergangszeit des Plungers, somit die Hubzahl der Maschine pro Zeiteinheit nach Belieben fixiert. Ein anderer Katarakt betätigte in ähnlicher Weise das Ausgleichventil; derselbe konnte so eingestellt werden, daß mit Ende des Anhubes eine Pause eintrat, während welcher der Pumpencylinder Zeit fand, sich vollkommen zu füllen.

Die Cornwallmaschine bietet insofern besonderes Interesse, als sie die erste Maschine war, deren Wirkungsgrad mit jenem guter moderner Maschinen verglichen werden kann. Durch eine Reihe von Jahren wurden Monatsberichte über die Wirtschaftlichkeit („*duty*“ genannt) dieser Maschinen veröffentlicht; darunter verstand man die Arbeit in Fußpfunden, welche per Scheffel oder per Zentner verbrannter Kohle geleistet wurde. Die Wirtschaftlichkeit der Maschine wurde förmlich zu einem sportlichen Interesse der Bergingenieure und keine Mühe wurde gespart, den Rekord zu schlagen. Die durchschnittliche Wirtschaftlichkeit dieser Maschinen in den Kohlendistrikten Cornwalls wuchs von ca. 18 Millionen Fußpfund per Zentner Kohle im Jahre 1813 auf 68 Millionen im Jahre 1844; nach dieser Zeit scheint man wieder weniger Anstrengungen gemacht zu haben, die Leistung hinaufzutreiben. In einzelnen Fällen wurden noch viel höhere Resultate mitgeteilt, bis zu 125 Millionen Fußpfund; diese Ziffer ist nach unserer heutigen Rechnungsweise gleichbedeutend mit $1\frac{3}{4}$ Pfund engl. (0,8 kg) Kohle per Stundenpferdekraft, ein Resultat, welches selbst von den besten modernen Dampfmaschinen kaum überschritten wird. Es fällt daher schwer, solchen Ziffern zu trauen, welche die Cornishmaschine jener Zeit auf ein Niveau stellen mit den leistungsfähigsten modernen Maschinen, in welchen durch die Vereinigung hoher Spannungen und mehrstufiger Expansion ein hoher thermischer Wirkungsgrad erreicht worden ist; die Verlässlichkeit und Genauigkeit dieser Berichte aus Cornwall müssen daher mit Recht angezweifelt werden. Diese Berichte spielen jedoch, ob verlässlich oder nicht, in dem Entwicklungsprozesse der Dampfmaschine eine sehr wichtige Rolle, indem durch sie zu einer Zeit, als die Dampfmaschinentheorie noch in den Kinderschuhen ruhte, die Aufmerksamkeit auf die Frage der Erhöhung der Wirtschaftlichkeit gelenkt und erwiesen wurde, welche Vorteile aus der Verwendung höher gespannter Dämpfe und partieller Füllungen resultieren.

Im Zusammenhange sei an dieser Stelle noch erwähnt, daß der große Erfolg der Cornwallmaschine ohne Zweifel die Ursache war, daß bis in die Neuzeit die Neigung bestand, diesem Beispiele folgend, zwischen dem Dampfzylinder und der Pumpe oder der Kurbel einen Balancier einzuschalten; für lange Zeit schien der Balancier, in einer oder der andern

Form ausgebildet, ein unvermeidlicher Teil der Dampfmaschine zu sein. Die Lehre, welche aus Bulls direktwirkender Dampfmaschine gezogen werden konnte, wurde, wie man sieht, von den Maschineningenieuren im allgemeinen lange Zeit hindurch unbeachtet gelassen.

Die **Compoundmaschine**. Das Compoundsystem, welches seit den Versuchen Woolls, dasselbe in den Kohlenbergbauen Cornwalls einzuführen, nahezu brach gelegen, wurde erst gegen Mitte des vorigen Jahrhunderts wieder aufgegriffen und durch das Zusammenwirken verschiedener Faktoren zu endlicher Geltung gebracht.

Es war im Jahre 1845 als Mac Naught auf den Gedanken kam, Balanciermaschinen der Wattschen Originalanordnung dadurch zu verbessern, daß zwischen der Balancierachse und der Kurbelwelle ein kleiner Hochdruckcylinder eingebaut werde, welcher mit Frischdampf von höherer Spannung gespeist, diesen an den eigentlichen oder Niederdruckcylinder abgiebt, in welchem er weiter expandiert. Diese Anordnung eignete sich besonders für ältere Maschinen, deren Leistung den an sie herantretenden Anforderungen nicht mehr zu genügen vermochte, und viele Maschinen, die unter solchen Verhältnissen arbeiteten, wurden in dieser Weise durch Anhängung des zweiten Cylinders verstärkt oder wie man zu jener Zeit sagte „*Mac Naughted*“, und erwiesen sich nach dem Umbau nicht nur leistungsfähiger, sondern auch ökonomischer hinsichtlich des Brennstoffverbrauchs.

Die Verbundform wurde nun von diesem Zeitpunkte an allgemeiner angewendet, so z. B. 1850 für die Pumpenmaschinen des Wasserwerkes in Lambeth und anderer Wasserwerke; im Jahre 1854 begann John Elder in Glasgow das Verbundsystem bei den Schiffsmaschinen einzuführen etc.

Von besonderer Wichtigkeit für die weitere Ausgestaltung des Verbundsystems, namentlich als direktwirkende Kurbelmaschine, war die zuerst von E. A. Cowper 1857 angewendete Einschaltung eines mit Dampfmantel versehenen Übergangreservoirs zwischen dem Hoch- und Niederdruckcylinder (der heutige Receiver), wodurch es unnötig wurde, daß der Niederdruckkolben seinen Hub in dem Momente begann, in dem der Hochdruckkolben seinen Hub beendete. In dem Maße als die mechanischen Schwierigkeiten im Baue von Kessel und Maschine nach und nach überwunden und auch in konstruktiver Beziehung wesentliche Fortschritte erzielt wurden, konnten auch höhere Dampfspannungen ohne Gefahr verwendet, dem Compoundsystem somit ein immer weiterer Spielraum eingeräumt werden; mit der zunehmenden Dampfspannung hielt die zunehmende Verbreitung der Verbundmaschine auch tatsächlich gleichen Schritt und heut-

zutage giebt es wohl kaum eine große Landdampfmaschine, noch weniger eine größere Schiffsmaschine, welche nicht compound wäre. Speziell im Schiffsmaschinenbau, wo die Ökonomie des Brennmaterials aus verschiedenen Gründen eine viel wichtigere Rolle spielt als bei Landdampfmaschinen, wurde das Prinzip der Verbundexpansion ungemein ausgedehnt, durch die allgemeine Einführung der drei- und fallweise auch der vierstufigen Expansion, bei welcher der Dampf successive in drei oder vier Cylindern (bei sehr großen Maschinen auch Doppelcylindern) expandiert. Auch die Lokomotivmaschinen, bei welchen zumeist andere Rücksichten als die Kohlenersparnis in erster Linie in Betracht kommen, werden in neuerer Zeit bereits als Verbundmaschinen gebaut, wenngleich die Verwendung der Compoundexpansion hier lange noch nicht allgemeinen Eingang gefunden hat.

Die ausgedehnte Anwendung und Ausgestaltung der Verbundexpansion war unbedingt der größte Fortschritt der Dampfmaschine seit Watts Zeit; im übrigen hat sich dieselbe immer mehr und mehr den Spezialbedürfnissen angepaßt, in den Detailkonstruktionen wesentlich vervollkommnet und in thermodynamischer Hinsicht die Errungenschaften der Wärmetheorie tunlichst zu Nutzen gemacht. In rein baulicher Beziehung hat die Dampfmaschine aus den Fortschritten der Erzeugung und Verarbeitung der Rohstoffe und Baumaterialien selbstverständlich den gleichen Nutzen gezogen wie alle übrigen Maschinen.

All diese Momente vereint ermöglichten die allmähliche Steigerung der Dampfspannung auf das acht- bis zehnfache der Spannung zur Zeit Watts, sowie die bedeutende Erhöhung der Kolbengeschwindigkeit bis zu 5 m per Sekunde, wodurch nicht nur wesentlich größere Leistungen bei gleicher Maschinengröße, sondern auch eine viel günstigere Ausnützung der Energie des Dampfes erreicht werden konnte.

Die Lokomotivmaschine. Die Anwendung der Dampfmaschine für Eisenbahnen, von Trevithick zuerst aufgegriffen, wurde von Georg Stephenson mit Erfolg durchgeführt. Seine erste Lokomotive, „Die Rakete“, übertraf gelegentlich der Probefahrten auf der Stockton- und Darlington-Eisenbahn 1829 die übrigen Konkurrenzmaschinen hinsichtlich der Geschwindigkeit und erledigte dadurch ein für allemal die Frage, ob Pferdekraft oder Dampfkraft für den Betrieb von Eisenbahnen benützt werden soll. Die wichtigsten Neuerungen dieser Maschine bestanden in einer Verbesserung des Blasrohres zur Erzielung lebhafterer Verbrennung, sowie in der Verwendung eines Röhrenkessels (Lokomotivkessels) zur besseren Ausnützung der Verbrennungswärme bei gleichzeitiger Vereinigung einer großen Heizfläche auf einem verhältnismäßig kleinen Raume.

Außerdem ordnete Stephenson die Cylinder, welche bei älteren Maschinen vertikal standen, geneigt an, welche Neigung später noch mehr verringert wurde, und verbesserte die Steuerung durch Anwendung der „Kulisse“, wodurch nicht nur ein rascheres Umsteuern, sondern auch ein präziseres Einstellen der Füllung ermöglicht wurde. In dem Maße als der stetig wachsende Verkehr immer höhere Anforderungen an alle Betriebsmittel der Eisenbahnen, also auch in erster Linie an die Lokomotive stellte, paßte sich diese unter den Händen genialer Konstrukteure den Bedürfnissen vollkommen an und erreichte eine Leistungsfähigkeit bei Geschwindigkeiten, die man seinerzeit für unmöglich hielt. In den Händen von Georg Stephenson und seinem Sohne Robert jedoch nahm die Lokomotive bereits eine Form an, welche in der Wesenheit auch bei den viel schwereren und leistungsfähigeren Lokomotiven der Gegenwart im allgemeinen erhalten blieb.

Die Schiffsmaschine. Das erste brauchbare Dampfboot war das Schlepsschiff „Charlotte Dundas“, 1802 von William Symington gebaut und in dem Forth- und Clydekanal ausprobiert. Eine Wattsche liegende doppeltwirkende Kondensationsmaschine arbeitete direkt auf die Kurbel der im Stern des Schiffes gelagerten Welle des Schaufelrades. Die Versuche an und für sich waren erfolgreich, aber führten insofern zu keinem Resultate, da man fürchtete, durch diese Schleppmethode die Seitendämme des Kanals zu beschädigen. Zehn Jahre später baute Henry Bell den „Komet“ mit seitlichen Schaufelrädern; dieses Schiff verkehrte als Passagierdampfer auf der Clyde. 1807 kam ein Schiff des Amerikaners Robert Fulton auf dem Hudson in Betrieb mit einer nach seinem Entwurfe von der Firma Boulton & Watt gebauten Maschine und brachte zum ersten Male die Dampfschiffahrt zu kommerziellem Erfolge.

Die Amerikaner begannen sehr bald darnach bei den Flußdampfern hohe Spannungen zu benützen, doch die englischen Ingenieure hüteten sich, eine Praxis zu üben, welche zu häufigen Kesselexplosionen Veranlassung gab; sie waren überhaupt schwer zu überzeugen, daß hohe Dampfspannung eine notwendige Bedingung ökonomischer Arbeit sei. Um das Jahr 1835 benützte man für Schiffskessel gewöhnlich keine höheren Spannungen als 4—5 Pfund pro Quadratzoll Überdruck (ca. $\frac{1}{4}$ bis $\frac{1}{3}$ Atmosphäre) und erst viele Jahre später waren Spannungen von 20—25 Pfund (ca. $1\frac{1}{3}$ — $1\frac{3}{4}$ Atmosphären) Überdruck gebräuchlich. Mit der Einführung der Verbundexpansion sowie der Verwendung cylindrischer Kessel an Stelle der ursprünglich benützten Kofferkessel nahm auch die Verwendung höherer Dampfspannungen bedeutend zu. — Sir F. Bramwell giebt in einer Publikation über Schiffsmaschinen vom

Jahre 1872*) eine Liste von Compoundmaschinen, welche mit Spannungen von 45—60 Pfund (3—4 Atmosphären) Überdruck arbeiteten. Der Kohlenverbrauch betrug bei diesen Maschinen gewöhnlich 2—2½ Pfund (0,9 bis 1,1 kg) pro indizierte Pferdekraftstunde und die mittlere Kolbengeschwindigkeit 350 Fuß englisch pro Minute (1,78 m pro Sekunde). Neun Jahre später publizierte F. C. Marshall eine ähnliche Liste**), in welcher die mittlere Pressung mit 77 Pfund (ca. 5 Atmosphären), die mittlere Kolbengeschwindigkeit mit 460 Fuß pro Minute (2,3 m pro Sekunde) und der Verbrauch an Kohle mit etwas weniger als 2 Pfund (0,9 kg) pro Pferdekraftstunde indiziert angegeben wird. Diese Maschinen waren gleichfalls Zweifachexpansionsmaschinen. Wenige Jahre darnach kamen die Dreifachexpansionsmaschinen allgemein in Gebrauch; die Dampfspannungen wurden als unmittelbare Folge merklich erhöht, der Kohlenkonsum nahm der besseren Wärmeausnützung entsprechend ab. In einem Rückblicke über die Fortschritte des Marineingenieurwesens innerhalb der Zeitperiode 1881—1891 giebt Mr. Blechynden***) eine Liste von Tripelmaschinen, welche mit mittleren Kesselspannungen von ungefähr 160 Pfund (10 bis 11 Atmosphären) Überdruck und Kolbengeschwindigkeiten von 500—600 Fuß pro Minute (2,5—3 m pro Sekunde) arbeiteten. Der Kohlenkonsum schwankte um 1,5 Pfund (0,68 kg) pro Pferdekraftstunde indiziert, welche Ziffer jedoch sehr angezweifelt werden muß†).

Die fortschreitende Steigerung der Dampfspannung, sowie der Kolbengeschwindigkeit hatte nicht nur eine stetige Zunahme der Leistungsfähigkeit der Maschinen, sondern auch, Hand in Hand damit gehend, eine wesentliche Verringerung des Raumbedarfes derselben für eine gegebene Leistung zur Folge, da die Leistung pro Flächeneinheit des Kolbens, als das Produkt aus der mittleren effektiven Pressung und der mittleren Kolbengeschwindigkeit in dem Maße zunimmt, als die Admissionsspannung und die Kolbengeschwindigkeit wächst. Die hohen Wirkungsgrade, welche bei den Schiffsmaschinen erreicht wurden, sind zum Teil auch durch die Größe derselben begründet, indem eine große Maschine unter sonst gleichen Verhältnissen günstiger arbeitet als eine kleine. Das rapide Anwachsen der Maschinendimensionen war durch die gesteigerte Konkurrenz bedingt und ist als ein Zeichen der Zeit der letzte Fortschritt auf dem Gebiete des Schiffsmaschinenbaues. Eine Leistung von 10 000 Pferdekraften indiziert

*) *Proceedings of the institution of mechanical engineers*, London 1872.

**) Ebenda, London, 1881.

***) Ebenda, London, 1891.

†) Eine sehr lehrreiche Zusammenstellung über die allmähliche Steigerung der Maschinendimensionen, der Dampfspannung und Kolbengeschwindigkeit der Schiffsmaschinen enthält die Schrift „*The progress of marine Engineering*“ von A. J. Durston; *Engineering*, Juli 1897.

pro Maschinensatz ist derzeit keine ungewöhnliche Leistung erstklassiger Ozeandampfer oder Kriegsschiffe. Die Maschinen der von den Firmen W. Cramp & Sons, sowie Harland & Wolff für die Internationale Schifffahrtsgesellschaft gebauten Dampfer „St. Luis“ und „City of New York“ indizieren 20 000, jene des von letzterer Firma für die White Star Line gebauten Dampfers „Oceanic“ 25 000; die beiden für die Cunard Line von der Firma Fairfield & Co. gebauten Dampfer „Lucania“ und „Campania“ je 28 000 Pferdekräfte, bei Kesselspannungen von 12 Atmosphären Überdruck und einer mittleren Kolbengeschwindigkeit von ca. 5 m pro Sekunde.

An der großartigen Entwicklung, welche die deutsche Industrie in den letzten Jahrzehnten genommen, ist der deutsche Schiff- und Schiffsmaschinenbau in erster Linie beteiligt. Vor etwa 30 Jahren noch in den Anfängen steckend, hat sich derselbe innerhalb dieser Frist zu imponierender Größe emporgeschwungen und bereits heute Deutschland vom Auslande vollkommen frei und unabhängig gemacht. Der Schnelldampfer „Kaiser Wilhelm der Große“ des Norddeutschen Lloyd, von der Aktiengesellschaft Vulkan in Stettin 1897 gebaut, hat mit einer beinahe jähen Überraschung den Fortschritt des deutschen Schiffbaues bewiesen. Nach den Mitteilungen der englischen Zeitschrift „*Engineering*“ vom Oktober 1897 hat dieser Dampfer seine Probefahrt über den Ozean mit einer so außerordentlichen Leistung abgeschlossen, welche die besten früheren Leistungen zwischen Southampton und New York überragte und auch den bis dahin durch die „Lucania“ aufgestellten besten Tagesrekord schlug. Die Maschinen des „Kaiser Wilhelm der Große“ indizieren 27 000 Pferdekräfte, arbeiten mit dreifacher Expansion in vier Cylindern mit 4,7 m mittlerer Kolbengeschwindigkeit*). In demselben Jahre sind zwei weitere Schiffe auf deutschen Werften vom Stapel gelaufen, welche zu den bedeutendsten Leistungen des Schiffbaues gerechnet werden dürfen und zwar der Schnelldampfer „Kaiser Friedrich“ auf der Werft von F. Schichau in Danzig und der Personen- und Frachtdampfer „Pretoria“ auf der Werft von Blohm & Voss in Hamburg. Der gleichfalls für den Norddeutschen Lloyd bestimmte „Kaiser Friedrich“ indiziert mit zwei Vierfachexpansionsmaschinen 28 000, die für die Hamburg-Amerika-Linie bestimmte „Pretoria“ allerdings nur 5000 Pferdekräfte, doch ist dieselbe neben ihrem in England erbauten Schwesterschiff „Pennsylvania“ das Dampfschiff größten Rauminhaltes in Deutschland.

Der Dampfer „Kaiser Wilhelm der Große“, welcher seinesgleichen bislang nicht hatte, wurde in neuester Zeit durch den im Jahre 1900 für

*) *Zeitschrift des Vereins deutscher Ingenieure*, 1897 und 1898.

die Hamburg-Amerikanische Packetfahrt-A.-G. von der Stettiner Maschinenbau-A.-G. Vulkan gelieferten Doppelschraubenschnelldampfer „Deutschland“ hinsichtlich der Leistungsfähigkeit noch übertroffen. Die gleichfalls vom „Vulkan“ gebauten Maschinen, bis heute die größten ihrer Art, bestehen aus zwei sechscylindrigen Vierfach-Expansionsmaschinen, welche zusammen bei 4,7 m mittlerer sekundlicher Kolbengeschwindigkeit und 15 Atmosphären Kesselüberdruck 33 000 Pferdekkräfte indizieren*).

Bei der außergewöhnlichen Bedeutung, welche die **Verbundmaschine** als **Schiffsmaschine** erlangt hat, erscheint ein kurzer geschichtlicher Rückblick auf ihre Entwicklung nach dieser Richtung von Interesse zu sein.

Durch die neueren Forschungen**) wurde unzweifelhaft nachgewiesen, daß die von John Cockerill in Seraing erbauten Niederdruckmaschinen der Dampfer „James Watt“ und „Herkules“ in den Jahren 1828 und 1829 von Roentgen in Fijenoord in Compoundmaschinen umgebaut wurden. Roentgen, von Geburt Deutscher, kann somit als Erfinder der Compoundschiffsmaschine, sowie der Mehrfach-Expansionsmaschine überhaupt angesehen werden, da er in seinen Patentschriften die Idee der mehrstufigen Expansion klar ausspricht. Ernest Wolf, welcher von anderer Seite***) als Erfinder der Compoundmaschine bezeichnet wird, war jedoch, wie sich nun herausgestellt hat, nur ein Agent Roentgens in England. Die Gründe, welche damals die Compoundmaschine nicht allgemein zur Geltung kommen ließen, sind heute nicht mehr verlässlich festzustellen; wahrscheinlich dürften die Schiffskessel jener Zeit den hohen Dampfdrucken nicht genügt haben. Es bedurfte weiterer 20 Jahre, bis sich die Ansicht über den Wert der Verbundexpansion soweit geklärt hatte, daß man ihre wirtschaftliche Bedeutung allgemein anerkannte, denn erst im Jahre 1854 gelang es den besonderen Bemühungen der Firma Randolph, Elder & Co. in Glasgow die Compoundmaschine bei der englischen Kriegsmarine einzuführen.

In der ersten Zeitperiode ihrer Verwendung arbeiteten die Compoundmaschinen nur mit zwei Cylindern; nachdem jedoch mit den zunehmenden Abmessungen der Schiffe und der gesteigerten Schiffsgeschwindigkeit die von den Maschinen geforderten Leistungen derart anwuchsen, daß es nicht mehr gut möglich war, dieselben in einem Hochdruck- und einem Niederdruckcylinder zu erzeugen, weil letzterer eine zu bedeutende Größe annehmen mußte, verteilte man die Arbeit des Niederdruckcylinders auf zwei

*) *Zeitschrift des Vereins deutscher Ingenieure*, 1900.

**) Ebenda, 1892: „G. M. Roentgen, der Erfinder der Mehrfach-Expansionsdampfmaschine“ von Brückmann.

***) A. Ledieu, *Les nouvelles machines marines*, Paris 1879.

Cylinder und entstanden daraus die noch heute auf größeren Handels- und Kriegsschiffen in Betrieb stehenden dreicylindrigen Compoundmaschinen.

Um die Wirtschaftlichkeit dieser Maschinen zu erhöhen, versuchte man mit Beginn der 80er Jahre die Dampfspannung, welche bei Compoundmaschinen 4 kg/qcm Überdruck betrug, allmählich bis auf 9 kg zu erhöhen. Der hiervon erhoffte Erfolg blieb jedoch, infolge der nun zu großen Druck- und Temperaturdifferenzen in den einzelnen Cylindern, aus; es lag daher der Gedanke sehr nahe, den Dampf statt in zwei, in drei aufeinanderfolgenden Cylindern expandieren zu lassen.

Dem englischen Konstrukteur Alexander Kirk gebürt das Verdienst, die erste praktisch brauchbare Dreifachexpansionsmaschine, die auch späteren Maschinen als Vorbild diente, gebaut zu haben. Bereits im Sommer 1874 hatte Kirk, damals bei John Elder in Glasgow, für den Dampfer „Propontis“ eine Dreifachexpansionsmaschine konstruiert; dieselbe arbeitete mit 8,8 kg/qcm Betriebsdruck, bewährte sich jedoch aus dem Grunde nicht, weil die Wasserrohrkessel derselben sich nach kaum 1½-jährigem Betrieb als unbrauchbar erwiesen*). Ähnlich erging es der im Herbst 1874 von Mr. Franklin für den deutschen Dampfer „Sexta“ entworfenen Maschine; auch dieser Versuch mißglückte infolge der für den hohen Betriebsdruck unbrauchbaren Kessel**). Eine dritte Maschine dieser Art wurde 1877 in England von Douglas & Grant für die Yacht „Isa“ gebaut, brachte es aber gleichfalls zu keinem namhaften Erfolge***). Die erste Dreifachexpansionsmaschine, welche sich wirklich bewährte, war die von Kirk konstruierte, von Napier & Sons in Glasgow erbaute und 1882 erprobte Maschine des Frachtendampfers „Aberdeen“. — Unmittelbar nach der „Aberdeen“-Maschine wurde 1883 die für den Dampfer „Isle of Dursey“ von Taylor konstruierte und bei der Wallsend Co. erbaute, sowie die für den Bremer Dampfer „Nierstein“ von Schichau in Elbing 1884 erbaute Dreifachexpansionsmaschine dem Betriebe übergeben. — In der deutschen Marine ist die Dreifachexpansionsmaschine im Jahre 1883 in Gebrauch gekommen.

Für noch größere Leistungen empfiehlt sich auch hier wie bei den Compoundmaschinen, wenn der Durchmesser des Niederdruckcylinders 2,3—2,5 m überschreiten müßte, denselben in zwei kleinere Niederdruckcylinder zu zerlegen; auf diese Weise entstand die von Schlick empfohlene Aufstellung der viercylindrigen Dreifachexpansionsmaschine mit zwei

*) C. Busley, *Die Entwicklung der Schiffsmaschine in den letzten Jahrzehnten*, Berlin 1892, 3. Aufl.

***) *Zeitschrift des Vereins deutscher Ingenieure*, 1886.

***) *Engineering*, 1879.

zwischen Hochdruck- und Mitteldruckcylinder liegenden Niederdruckcylindern und vier Kurbeln*). Viercylindrige Dreifachexpansionsmaschinen entstanden aber auch durch den Umbau von zweicylindrigen Compound- in Dreifachexpansionsmaschinen; da dieser Umbau ohne Vergrößerung des Maschinenraumes erfolgen mußte, so wählte man als in jeder Beziehung günstigste Anordnung die Teilung des Hochdruckcylinders und setzte je einen Hochdruckcylinder über den Mittel- beziehungsweise Niederdruckcylinder; auf diese Weise entstand die viercylindrige Dreifachexpansionsmaschine mit zwei unter 90° versetzten Kurbeln. In dieser Art wurden vom Vulkan in Stettin im Jahre 1890—1891 umgebaut die Maschinen der Norddeutschen Lloyd-Dampfer „Hohenzollern“, „Hohenstaufen“, „Habsburg“ und „Salier“.

Für ungewöhnlich große Dreifachexpansionsmaschinen stellte sich analog wie bei Compoundmaschinen das Bedürfnis heraus, um einen symmetrischen Maschinenaufbau und gleichmäßigere Druckverteilung zu erzielen, außer dem Niederdruckcylinder auch den Hochdruckcylinder zu spalten und je einen Hochdruck- über einen Niederdruckcylinder, vereint auf eine Kurbel arbeitend, zu stellen, den Mitteldruckcylinder dagegen allein die mittlere, als dritte Kurbel, bewegen zu lassen. Auf diese Weise entstand die fünfzylindrige Dreifachexpansionsmaschine. Solche Maschinen besitzen z. B. die beiden von Fairfield & Co. erbauten, vorhin erwähnten größten Zweischraubenschnelldampfer der Cunard-Linie „Campania“ und „Lucania“; ferner die Schnelldampfer des Norddeutschen Lloyd „Havel“ und „Spree“. Diese Maschinen indizierten während der Probefahrten ca. 25 000—25 600 Pferdekkräfte**).

Die erste Vierfachexpansionsmaschine, welche als Schiffsmaschine Verwendung fand, wurde 1884 von der Barrow-Schiffbaugesellschaft in Barrow-in-Furness für den Dampfer „County of York“ gebaut. Im Sommer 1886 waren schon vier Dampfer des englischen Lloyd mit Vierfachexpansionsmaschinen ausgerüstet und seitdem hat die Zahl derselben 100 bereits überschritten. Die Vierfachexpansionsmaschinen werden entweder mit zwei, drei, vier oder sogar mit fünf Kurbeln ausgeführt, je nach der Gruppierung der vier Cylinder. Maschinen der letzteren Art erhielten geteilten Niederdruckcylinder; die Dreikurbelmaschine dreifach geteilten Hochdruckcylinder, also im ganzen sechs Cylinder. Nach den bisher gemachten Erfahrungen steht für die Vierfachexpansionsmaschine erst bei Anfangsspannungen von 15 kg/qcm Überdruck, also bei Eintrittstemperaturen des Dampfes von 200° C., ein wirklicher Vorteil über die

*) *Transactions of the institution of naval architects*, London 1894.

**) C. Busley, *Die Schiffsmaschine*, 3. Aufl. 1898, Lipsius & Tischer.

Dreifachexpansionsmaschine in Aussicht; dieser Vorteil aber fällt trotzdem wesentlich geringer aus, wie der Vorteil der Dreifachexpansionsmaschine gegenüber der Compoundmaschine.

Litteraturnachweis.

- Dircks*, Life of the Marquis of Worcester, 1865, containing a reprint of the Century of Inventions (1663).
- Desaguliers*, Course of Experimental Philosophy, 1763.
- Robison*, System of Mechanical Philosophy, Vol. II, 1822.
- Stuart*, Descriptive History of the Steam-Engine, 1825.
- Farey*, Treatise on the Steam-Engine, 1827.
- Tredgold*, The Steam-Engine, 1838.
- Muirhead*, Mechanical Inventions of James Watt, and Life of Watt.
- Galloway*, The Steam-Engine and its Inventors.
- Thurston*, History of the Growth of the Steam-Engine.
- Cowper*, On the Steam-Engine (Heat Lectures, Inst. C. E. 1884).
- M. Rühlmann*, Allgemeine Maschinenlehre, Braunschweig, 1868, 1875 und 1876.
- C. Matschoss*, Geschichte der Dampfmaschine, Berlin, 1901.
- Th. Beck*, Beiträge zur Geschichte des Maschinenbaues, 1899, Springer in Berlin.
- Ad. Ernst*, James Watt und die Grundlagen des modernen Dampfmaschinenbaues, 1897, Springer in Berlin.
- C. Busley*, Die Entwicklung der Schiffsmaschine in den letzten Jahrzehnten, 3. Aufl., 1892, Berlin.
- C. Busley*, Die Schiffsmaschine, 3. Aufl., 1891, 1898, 1901, Lipsius & Tischer.
-