

Schon Murdoch, eine Zeitgenosse Watts, brachte eine Maschine in Vorschlag, welche in ihrer Anordnung und Wirkungsweise den heutigen Kapselwerken verwandt war*). Andere Konstruktionen, welche durch die Litteratur bekannt geworden sind, sind die rotierenden Dampfmaschinen von Witty 1811, Morey 1819, Ward 1821, Morgan 1830, Cochrane 1831, Yule 1836, Davies 1837, Lamb 1842, Bährens 1847, Simpson und Shipton 1848, Jones und Shirreff 1856, Hall 1869 u. a. Keine dieser Konstruktionen konnte als Dampfmaschine irgend eine praktische Bedeutung erlangen und trotz der Fülle der Formen, welche dieselben aufweisen, liegt doch allen mehr oder minder derselbe Gedanke zugrunde: die potentielle Energie beziehungsweise die Expansivkraft des Dampfes zur Hervorbringung rotierender oder oszillierender Bewegung von in einem Gehäuse eingekapselter Flügel oder Sektoren nutzbar zu machen**).

In allen Konstruktionen findet man Dampfkammern, deren Volumen durch die Wechselwirkung der zusammenarbeitenden Elemente abwechselnd vergrößert und verkleinert wird; bei der Mehrzahl derselben besitzt ein Teil dieser Elemente die hin- und hergehende, pendelnde oder geradlinig absetzende Bewegung, welche eben durch das Rotationsprinzip vermieden werden sollte. Allerdings dienen diese Elemente bei vielen Konstruktionen als verschiebbare Scheidewände oder bewegliche Abschlußorgane, obgleich sie bei anderen Konstruktionen auch direkt als Kraftaufnehmer verwendet sind.

So lange eine Maschine mit mäßiger Geschwindigkeit läuft, bietet die Vermeidung der hin- und hergehenden Bewegung wenig Vorteile; durch die absetzende Bewegung des Kolbens, der Kolbenstange und des Kreuzkopfes wird weder die Reibungsarbeit der Maschine wesentlich beeinflusst, noch der Gleichgewichtszustand derselben als ein geschlossenes Ganzes gestört, noch die Anstrengung des Kurbel- und Kreuzkopfpapfens gefährlich erhöht. Kommen jedoch hohe Geschwindigkeiten in Betracht, dann ändert sich die Sachlage sehr zuungunsten der Maschinen mit absetzender Bewegung; die tunlichste Verminderung derselben sowie der Masse aller abwechselnd bewegten Teile erscheint um so notwendiger, je mehr man mit der Geschwindigkeit hinaufgeht.

207. Dampfturbinen. Die Arbeitsweise der gewöhnlichen Dampfmaschine mit absetzender Bewegung beruht bekanntlich darauf, daß man den Dampfkolben beziehungsweise den auf denselben einwirkenden Dampf in der Maschine keine namhafte Geschwindigkeit annehmen läßt, sondern dem Drucke des expandierenden Dampfes einen Widerstand entgegenstellt,

*) Siehe Fareys *Treatise on the Steam-Engine*.

***) Eine große Anzahl solcher Maschinen beschreibt Reauleaux in seinem bekannten Werke: *Theoretische Kinematik*, Braunschweig 1875.

welcher demselben gleichkommt. Man strebt hierbei, wie bereits an früherer Stelle eingehend erörtert, den Dampf so zu leiten, daß er eine Reihe umkehrbarer Zustandsänderungen durchläuft, um schließlich wieder in den Anfangszustand zurückzukehren, also einen idealen Kreisprozeß von dem Grenzwerte des Carnotschen Kreisprozesses $\frac{T_1 - T_2}{T_1}$, worin T_1 und T_2 die absoluten Grenztemperaturen des Dampfes während dieses Prozesses sind, zu erreichen. Es ist andererseits aber auch bekannt, daß man in Wirklichkeit von der Erreichung dieses idealen Grenzwertes weit entfernt bleibt, indem zufolge der unvermeidlichen Abweichungen des wirklichen Kreisprozesses von dem idealen, sowie infolge der bedeutenden Wärmebeziehungsweise Energieverluste bei der Erzeugung, Leitung und Verarbeitung des Dampfes, unter den günstigsten Umständen, mit unseren besten und größten Kolbenmaschinen nur 13 bis 14 Prozent der potentiellen Energie aus dem Brennstoffe erhalten werden.

Die Arbeitsweise der Dampfturbine unterscheidet sich von jener der Dampfmaschine dadurch, daß man entweder den Dampf unter dem seiner Spannung entsprechenden Druck beziehungsweise mit der diesem Drucke entsprechenden Temperatur in den Motor einführt und die allmähliche Ausdehnung desselben durch eine Reihe abwechselnder unbeweglicher Verteiler und rotierender Turbinenräder im Motor selbst vollzieht, oder daß man den bereits vollkommen ausgedehnten Dampf, welcher somit vor Eintritt in den Motor jene Geschwindigkeit erlangt hat, die durch die Druckdifferenz der zwei Mittel bestimmt ist, mit welchen man operiert (Dampfkessel und atmosphärische Luft, beziehungsweise Dampfkessel und Kondensator), an die Schaufeln des Empfängers gelangen läßt, also lediglich nur die lebendige Kraft (Strömungsenergie) des Dampfes ausnützt. Die Ausdehnung vollzieht sich hierbei auf dem Wege des Dampfes vom Einlaßorgan bis zur Mündung des Dampfverteilungsrohres (Dampfdüse). Der Dampf erlangt während dieser Zeit infolge seiner Ausdehnung die derselben proportionale lebendige Kraft in gleicher Weise, als wenn sich die Expansion hinter dem Kolben einer Dampfmaschine vollzogen hätte. Dampfturbinen dieser Arbeitsweise sind daher Freistrahlturbinen, während Dampfturbinen der ersteren Art, bei welchen die Energie des Dampfes stufenweise dadurch ausgenützt wird, daß man dem Aufnehmer durch fortwährende Änderung der relativen und abgestufte Reduktion der absoluten Geschwindigkeit die entsprechende Bewegungsmenge erteilt, den Charakter der Überdruckturbine an sich tragen, nur mit dem Unterschiede, daß sich hier die Arbeitsaufnahme nicht in einer einzigen, aus Leitapparat und Laufrad bestehenden Turbine, sondern in einer Reihe hintereinander geschalteter Einzelturbinen, deren Räder auf gemeinschaftlicher Achse sitzen, vollzieht.

Unter den zahlreichen hierher gehörigen Erfindungen haben sich jedoch, soweit es sich um wirklich praktische Erfolge handelt, nur zwei Dampfturbinensysteme bewährt, und zwar die Mehrstufen- oder Compound-überdruckturbine von Parsons (erste Konstruktion 1884) und die einstufige Freistrahlturbine von de Laval (erste Konstruktion 1883). Die Parsonschen Turbinen haben bisher für Leistungen bis 3000 PS pro Motor, die de Laval-Turbinen jedoch nur für Leistungen bis 300 PS ausgebreitete Anwendung gefunden, doch soll de Laval in neuester Zeit damit beschäftigt sein, seine Konstruktion auch für Leistungen von 300 bis 600 PS in Ausführung zu bringen.

Die Geschichte der Dampfturbine reicht bis auf das letzte Jahrhundert vor Christi Geburt zurück. Hero von Alexandrien hinterließ unter anderem ein Werk betitelt „*Spiritualia seu Pneumatica*“, in welchem er eine größere Anzahl von Mechanismen beschreibt, welche er zum Teil selbst erfunden, teils als Erfindungen anderer gesammelt hatte. Zwei dieser Mechanismen sind für die historische Entwicklung der Wärmekraftmaschine von besonderem Interesse. Die eine dieser Maschinen nützt die Expansivkraft der erhitzten Luft aus, um Wasser aus kombinierten Gefäßen zu verdrängen und auf diese Weise gewisse beabsichtigte Bewegungen zu erzielen, während die andere eine wirkliche Dampfmaschine und zwar vermöge der Wirkungsweise des Dampfes eine Dampfturbine ist, von dem Erfinder Aëlopile genannt. (Skizze beziehungsweise Beschreibung dieser Apparate sind in der geschichtlichen Einleitung enthalten.)

Es läßt sich heute nicht mehr nachweisen, ob diese Dampfturbine nur als Spielzeug, oder gleich den anderen Mechanismen von den griechischen Priestern zur Bewegung von allerlei Apparaten in deren Tempeln benützt wurde; nach den Erfahrungen der letzten zwanzig Jahre erscheint es jedoch wahrscheinlich, daß diese Maschine mit einigen Verbesserungen ihrer Konstruktion und Gesamtanordnung zur Verrichtung nützlicherer Arbeiten jener Zeit hätte verwendet werden können und daß die so verbesserte Maschine selbst bis in die Mitte des abgelaufenen Jahrhunderts einen würdigen Platz unter den ökonomischen Dampfmaschinen gefunden hätte.

Die großen Schwierigkeiten, welche sich der Einführung von Heros Turbine entgegenstellten, war unbestritten die hohe Tourenzahl, welche zur Erreichung befriedigender Resultate erforderlich gewesen wäre, sowie der damalige Stand der Maschinenmechanik beziehungsweise des Maschinenwesens überhaupt, von welchem eine zur Erzielung solcher Resultate erforderliche, genügend exakte Ausführung der Maschine nicht erwartet werden konnte, ganz abgesehen von der Unmöglichkeit, bei den Einrichtungen jener Zeit so hohe Umlaufzahlen in die für die gewöhnlichen Zwecke erforderliche geringe Anzahl von Umdrehungen umsetzen zu können.

Die nächste, in der Geschichte erwähnte Dampfmaschine, welche einer praktischen und nützlichen Entwicklung fähig gewesen wäre, ist die Maschine Brancas vom Jahre 1629. Die Anordnung der Maschine war höchst einfach, indem man aus dem Schnauzenrohr eines birnenförmigen Kessels den Dampfstrahl direkt gegen ein gewöhnliches Schaufelrad blasen ließ, wodurch dieses in Umdrehung versetzt wurde. Die Erfindung Brancas war somit eine reine Freistrahlturbine; ihr Arbeitsprinzip wurde 250 Jahre später von Dr. de Laval in Stockholm mit großem Geschick bei seinen Turbinen in Anwendung gebracht. Die Umlaufszahl dieser Turbine ist jedoch zur Hervorbringung ökonomischer Dampfarbeit notwendigerweise sehr groß, muß daher durch Getriebe so weit vermindert werden, um überhaupt anwendbar zu sein. Die Verbesserungen der Dampfturbine Brancas durch de Laval bestehen darin, daß einerseits, statt der gewöhnlichen Schnauze, konische, gegen das Ende divergierende Düsen verwendet werden, wodurch die Expansion des Dampfes vor Austritt desselben aus der Düse stattfindet, somit die potentielle Energie des hochgespannten Dampfes in der Düse selbst in Strömungsenergie verwandelt wird, andererseits das plumpe Schaufelrad Brancas durch ein Rad aus bestem Stahle ersetzt wurde, dessen Peripherie mit vielen kleinen becherförmigen Schaufeln, welche eine gewisse Ähnlichkeit mit den Schaufeln des Peltonwasserrades besitzen, versehen ist.

Es ist bemerkenswert, daß erst ungefähr ein Jahrhundert nach Branca, um das Jahr 1705, die Kolbenmaschine ersonnen wurde. Seit jener Zeit wurde die Dampfturbine als solche, trotz der vielen Versuche zahlreicher Erfinder, eine direkt rotierende Dampfmaschine zu konstruieren, praktisch gänzlich vernachlässigt. Erst gegen Ende des vorigen Jahrhunderts machte sich, hervorgerufen durch die großartigen Erfolge der Elektrotechnik, das Bedürfnis nach einer guten, schnelllaufenden Maschine ernstlich fühlbar; auch hatte man sich um jene Zeit bereits daran gewöhnt, mit hohen Tourenzahlen zu rechnen und zu arbeiten. Die Dynamos arbeiteten damals (anfangs der achtziger Jahre) mit 1000 bis 2000, Zentrifugalpumpen mit 300 bis 1500 und Holzbearbeitungsmaschinen mit 3000 bis 5000 minutlichen Umdrehungen. Es drängte sich daher von selbst das Problem der Konstruktion einer ohne jede hin- und hergehende Bewegung rotierenden Maschine auf, also das Problem einer Dampfturbine, welche bei befriedigender Wärmeökonomie und nicht zu hoher Umlaufzahl ohne Anwendung eines Reduktionsgetriebes direkt mit der Dynamomaschine gekuppelt läuft. Um die Lösung dieses Problemes zu ermöglichen, trachtete man zugleich die Umlaufzahl der Dynamos so weit als möglich, d. h. bis zur untersten Grenze der ökonomischen Umlaufzahl der Turbine zu erhöhen, oder mit anderen Worten: um eine erfolgreiche

direkte Verbindung beider erzielen zu können, muß die Turbine so langsam als möglich, die Dynamomaschine hingegen so rasch als möglich laufen.

Die großen Vorteile, welche die Dampfturbine im übrigen gegenüber der Kolbenmaschine bietet, welche nicht nur in dem Entfalle des ganzen Kurbelmechanismus mit den hin- und hergehenden Massen, der zum Teil sehr komplizierten Steuerung, des Schwungrades, der massigen Fundamente etc. zu suchen sind, bringen es mit sich, daß gegenwärtig allerorts eine sehr rege Tätigkeit entfaltet wird, um die Dampfturbine im Wettbewerbe mit der Kolbenmaschine weiter zu vervollkommen. Die Ziele, welche man anstrebt, sind die Verminderung der außerordentlich hohen Umlaufzahlen, die Erhöhung der Wärmeökonomie und die Möglichkeit der Umsteuerbarkeit. Hinsichtlich der Dampfkonomie wurden bereits wesentliche Fortschritte erzielt und sogar sehr günstige Resultate erreicht; es sei diesfalls auf die Versuche mit der 1500 PS-Parsonsturbine der Elberfelder Zentrale (*Z. d. Ver. Deutscher Ing.* 1900, S. 829), auf jene mit einer 300 PS-de Lavalturbine der Krummauer Maschinenpapierfabriken zu Pötschmühle (*Z. d. Ver. D. Ing.* 1901, S. 150), sowie auf die Versuche mit zwei 100 PS-Lavalturbinen der Manufakturen von L. Grohmann in Lodz (*Z. d. Ver. D. Ing.* 1901, S. 1678) hingewiesen. Die Parsonsturbine arbeitete mit 1500 Umdrehungen pro Minute und verbrauchte bei 10,47 Atmosphären Kesselspannung-Überdruck 6,73 kg/PS_e-Stunde gesättigten Dampf. Die 300 PS-Lavalturbine ergab bei 10500 Minutenumdrehungen und 10,5 Atmosphären Kesselspannung einen Verbrauch an gesättigtem Dampf von 7,05 kg/PS_e-Stunde. Eine im städtischen Elektrizitätswerk in Brünn aufgestellte 300 PS-Lavalturbine ergab bei einer Dampfspannung von 11 Atmosphären und 9000 Minutenumdrehungen einen Verbrauch an mäßig (ca. 30° C) überhitzten Dampf von 7,97 kg/PS_e-Stunde. Die beiden vorerwähnten 100 PS-Lavalturbinen benötigten bei 12,4 Atmosphären mittlerer Kesselspannung und einer Überhitzung auf 280° C 8,16 kg/PS_e-Stunde Dampf. Die Turbinen arbeiteten sämtlich mit Kondensation.

Die bisher gemachten Erfahrungen lassen außer Zweifel erscheinen, daß durch Steigerung des Druckes und der Temperatur des Dampfes der Dampfverbrauch noch wesentlich vermindert werden kann und daß namentlich bei Verwendung hoher Überhitzung ähnliche Verbrauchsziffern erreicht werden dürften, wie sie in neuester Zeit mit Heißdampfkolbenmaschinen erzielt wurden.

Über den Einfluß hoher Dampfüberhitzung auf den Dampfverbrauch der Lavalturbine wurden in jüngster Zeit sehr instruktive Versuche im Maschinenlaboratorium der technischen Hochschule in Dresden an einer

30-pferdigen de Laval dampfturbine durchgeführt*), welche zu sehr bemerkenswerten Resultaten führten. Die Ergebnisse dieser Versuche bei halber und voller Beaufschlagung sind in nachstehender Tabelle XV zusammengestellt.

Tabelle XV.

Eintrittsspannung des Dampfes 7 kg/qcm absolut. Betrieb ohne Kondensation. Umlaufzahl am Vorgelege 2000 pro Minute.

	Halbe Beaufschlagung		Volle Beaufschlagung	
	Gesättigter Dampf	Überhitzter Dampf	Gesättigter Dampf	Überhitzter Dampf
Dampftemperatur in C°	164	460	164	500
Brennleistung in PS	21,4	24,5	44,1	51,9
Dampfverbrauch in kg pro PS-Stunde	21,6	14,1	17,7	11,5
Wärmeverbrauch in W.E. pro PS-Stunde	14 160	11 270	11 610	9390
Austrittstemperatur des Dampfes in C°	100	309	100	343
Zurückzugewinnende Wärme pro PS-Stunde in W.E.	0	1415	0	1340
Ersparnis gegen gesättigten Dampf bei Regenerierung bis auf den Sättigungszustand in Prozenten	0	30	0	31

Die Versuche wurden selbstverständlich nicht auf die in dieser Tabelle enthaltenen Anfangs- und Endwerte, sondern auch auf eine Reihe zwischenliegender Temperaturen des Eintrittsdampfes ausgedehnt. Aus diesen Versuchen geht hervor, daß eine zunehmende Überhitzung des Dampfes nicht nur den Dampf- beziehungsweise Wärmeverbrauch vermindert, sondern auch bei sonst gleichbleibenden Verhältnissen die effektive Leistung erhöht.

Diese Tatsache ist dadurch begründet, daß einerseits zufolge der geringeren Reibung des Turbinenrades im noch überhitzten Austrittsdampf die Leerlaufarbeit vermindert, andererseits aber auch durch die Überhitzung die Strömungsenergie pro Gewichtseinheit Dampf vermehrt wird. Diese Vermehrung der Strömungsenergie ruft allerdings eine Verminderung des von der Geschwindigkeit des Dampfes abhängigen hydraulischen Wirkungsgrades hervor, doch ist diese Reduktion nur von untergeordneter Bedeutung, weil durch den vergrößerten Eintrittsstoß (bei gleichbleibender Umfangsgeschwindigkeit des Rades) wieder eine Erhöhung der Dampftemperatur im Austrittsraume hervorgerufen wird, welche ihrerseits wieder

*) Ztschr. des Ver. Deutscher Ing. 1901, S. 1716: E. Lewicki, Versuche an einer de Laval dampfturbine.

den Leerlaufwiderstand vermindert, beziehungsweise den mechanischen Wirkungsgrad erhöht. Diese Erhöhung des mechanischen Wirkungsgrades überwiegt, wie die Versuche ergaben, bei hoher Überhitzung und entsprechend hohem Dampfdruck die Verminderung des hydraulischen Wirkungsgrades.

Um die Temperaturzunahme des austretenden Dampfes bei zunehmenden Eintrittsstoß konstatieren zu können, wurden die Versuche Lewickis auch auf Änderung der Umlaufzahl des Motors bei gleichbleibender Eintrittsspannung und Beaufschlagung ausgedehnt und ergaben als Schlußwerte die in nachstehender Tabelle XVI enthaltenen Zahlen.

Tabelle XVI.

Umlaufzahl der Vorgelegewelle pro Minute	2354	1790	1182	601
Gemessene Eintrittstemperatur C°	363	364	369	366
„ Austrittstemperatur C°	234	248	266	280

Diese Versuchsreihe ergibt somit außer Zweifel, daß bei gleichbleibender Dampfeintrittsgeschwindigkeit und abnehmender Radgeschwindigkeit infolge der Erhöhung des Stoßes des Dampfes gegen die Schaufeln des Rades eine ziemlich bedeutende Zunahme der Temperatur des Austrittsdampfes eintritt.

Eine andere Erweiterung erfuhren die in Rede stehenden Versuche zur Erbringung des Nachweises, daß der Leerlaufwiderstand des Turbinenrades mit zunehmender Überhitzung tatsächlich abnimmt. Die Resultate dieser Versuchsreihe sind in Tabelle XVII zusammengestellt.

Tabelle XVII.

Umlaufzahl des Motors konstant 20000 (2000 am Vorgelege)
pro Minute.

Das Turbinenrad lief	Totale Leerlaufarbeit der Turbine bei at- mosphärischem Druck in PS	Radwiderstand in PS	
		bei atmo- sphärischem Druck	im Vakuum von 0,36 kg absolut
in Luft (ca. 30° C) . .	6,80	4,60	—
in gesättigtem Dampf	5,50	3,30	1,50
(123° C)	5,10	2,85	0,95
in überhitzten	4,55	2,25	—
Dampf von (184° C)	4,30	2,05	—
(244° C)	4,15	1,88	0,60
(300° C)			

Die Leerlaufarbeit wurde mittels eines geeichten Elektromotors gemessen.

Durch diese Versuchsreihe wurde festgestellt, daß der Widerstand, welchen gesättigter Dampf dem Rade bei seiner Drehung entgegenstellt, geringer ist, wie jener der Luft, daß ferner stark überhitzter Dampf diesen Widerstand sehr bedeutend vermindert; im vorliegenden Falle betrug diese Verminderung 1,3 beziehungsweise 1,42 PS (bei 300° Überhitzung) gegenüber atmosphärischer Luft beziehungsweise gesättigtem Dampf von 100° C Temperatur; also 30 beziehungsweise 43 Prozent. Auffallender ist die Abnahme des Radwiderstandes im Vakuum; dieselbe betrug bei derselben Überhitzung 0,90 PS, also 60 Prozent. Nach diesem Versuchsergebnis zu schließen dürfte die Kondensation bei hochgehender Überhitzung gleichfalls die Wärmeökonomie erhöhen. Behufs Lösung dieser Frage werden im Maschinenlaboratorium der technischen Hochschule in Dresden noch weitere Versuche durchgeführt.

Aus diesen verschiedenen Versuchen geht unzweifelhaft hervor, daß sich die Lavalturbine ohne irgend welche Schwierigkeiten mit hochüberhitztem Dampf betreiben läßt; nachdem der Dampf auf den Gegendruck entspannt, also auch mit viel geringerer Temperatur aus der Düse austritt, als er in dieselbe eintritt, daher das Rad, die Welle und Stopfbüchse nur mit dem abgekühlten spannungslosen Dampf in Berührung kommen, so kann man mit der Überhitzung bis zu den höchsten, mit den heutigen Einrichtungen erreichbaren Temperaturen gehen, während man bekanntlich bei den Kolbenmaschinen wegen der Schmierung derzeit noch an Grenztemperaturen von 350° bis 380° C gebunden ist*).

208. Die de Laval-Dampfturbine. Die allgemeine Anordnung einer größeren Turbine ist aus Fig. 227 ersichtlich; der rechts von dem Wechsellrädergehäuse *t* liegende Teil der Figur ist ein Längenschnitt durch die Turbine, der linke Teil ein Längenschnitt durch das Vorgelege. Der eigentliche Turbinenapparat ist höchst einfach und besteht aus dem Laufrad *f* samt Achse und den Dampfverteilungsdüsen. Das Laufrad befindet sich in einem Gehäuse, an welches sich die Dampfableitungskammer *r* anschließt. Der vom Kessel kommende Dampf tritt durch den Stutzen *a* ein, durchströmt eine Dampfeinlaßbüchse, in welcher sich ein cylinderförmiges Haarsieb *c* zu dem Zwecke befindet, um etwaige Verunreinigungen zurückzuhalten, und gelangt hierauf durch das Regulierventil *d* in einen ringförmigen Verteilungskanal *e* und von diesem in die Dampfverteilungsdüsen, welche innerhalb dieses Kanales an der Peripherie des Turbinen-

*) In *Scientific American Supplement* 1901 erschien eine Arbeit von H. Thurston, welche gleichfalls die Wichtigkeit der Überhitzung beim Dampfturbinenbetrieb betont und diesbezügliche Versuchsergebnisse mitteilt.