

Zur Theorie der de Laval'schen Dampfturbine

Autor(en): **Fliegner, A.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizerische Bauzeitung**

Band (Jahr): **37/38 (1901)**

Heft 14

PDF erstellt am: **26.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-22774>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

romain est le plus long et le plus considérable que nous ayons en Suisse.

Depuis l'époque romaine, il n'a pas été fait de grands travaux en vue de l'alimentation d'eau. Cependant l'Etat, les chefs-lieux de districts et les couvents ont fait quelques modestes installations de ce genre.

A partir de l'année 1870, beaucoup de conduites d'eau, sous pression, ont été établies dans notre canton. Ces installations, au nombre de 21, comprennent des pressions statiques variant de 1,2 à 16,5 atmosphères. Le nombre des hydrants est de 372 et l'étendue des conduites de 50 km, en chiffre rond. Il a été dépensé pour ces installations d'eau fr. 2 271 508,50, dont fr. 1 099 871 pour celle de Fribourg (Voir 4^{ème} rapport, page 4, année 1874, du Conseil d'administration de la Société des Eaux et Forêts). — Le tableau ci-après résume les principales données concernant les distributions d'eau.

Localités	Capacité des réservoirs m ³	Nombre d'hydrants	Conduites		Pression statique m	Coût Francs	Subsides accordés par l'Etat Francs	Observations
			Longueur m	Débit en litres-min.				
Albeuve . . .	—	8	580	—	25-30	9000	1000	Captation de la source dans le lit de la Marivue.
Bas-Vuilly . . .	300	16	5010	176	30-48	52000	6440	
Bulle	500	45	12000	2200	87-100	300000	15000	358 litres par habitant et par jour.
Broc	200	11	1741	600	49-53	34040	3400	
Charmey	100	10	1119	500	12-35	36367	3640	
Orésuz	108	4	480	30	44-58	8511	850	
Châtel St-Denis	300	25	4571	1000	60-93	153000	15500	
Droguens	150	6	280	—	—	17500	3600	
Enney	82	6	—	450	68	17000	1575	
Estavayer	120	23	—	450	50-80	175600	6500	
Estavannens	250	8	1080	110	36-75	20340	2000	
Fribourg	6000	88	4000	800-900	165	1099871	—	
Fraeschels	145	10	755	110	15-50	26120	2610	
Grandvillard	90	14	1990	—	68-105	17000	1600	
Gruyères	50	5	1790	75	114	22500	418	
Lessoc	135	8	685	—	—	10965	1080	
Montbovon	50	4	100	minimum 15 maximum 50	45	5000	670	
Morat	500	33	3411	185	45-50	98654	5000	Source de la Neirigue.
Neirivue	—	11	1170	1200	33	16340	1634	
Vaulruz	200	27	5532	200	51-113	123700	4000	
Villarvolard	200	10	942	115	23-32	26000	1500	
	9480	372				2271508	78017	

(à suivre.)

Zur Theorie der de Laval'schen Dampfturbine.

Gegen einige Anschauungen, die ich in meinen Veröffentlichungen: „Versuche über das Ausströmen von Luft durch konisch divergente Rohre“ und „Theorie der Dampfturbinen“ in dieser Zeitschrift¹⁾ über die Turbinen von de Laval geäußert habe, sind von einigen Seiten Einwände erhoben worden. Soweit es sich dabei um Einwände handelt, die sich nur auf eine persönliche Meinung des Gegners stützen, erscheint deren weitere Erörterung nutzlos. Anders steht es dagegen mit Einwänden, die aus besonderen, einschlagenden Versuchen hergeleitet sind. Da erscheint es nötig zu prüfen, ob solche Versuche zweckmässig angeordnet und einwandfrei verwertet worden sind.

In dieser Richtung möchte ich hier eine Arbeit kurz besprechen, die mir unlängst zugeschickt worden ist: Schütz, Die Ausnutzung des Dampfes in den Laval-Turbinen, Inaugural-Dissertation vor der philosophischen Fakultät der Universität zu Göttingen.²⁾

Bei den in dieser Schrift dargestellten Versuchen mit einer Laval-Turbine wurde der Druck unter anderen auch an folgenden zwei Stellen gemessen: unmittelbar vor dem letzten Flansch, an dem das Abdampfrohr befestigt war, durch eine Seitenbohrung, und unmittelbar hinter dem Laufrade mit einem Röhrchen, das, parallel zur Achse

stehend und senkrecht zu ihr abgeschnitten, dem Laufradkranze von der Austrittsseite her auf 3 mm genähert war, und zwar mitten zwischen zwei Einlaufdüsen. Ueber die Ergebnisse dieser Druckbeobachtungen sagt Schütz auf Seite 15, rechts oben: „Der Druck unmittelbar hinter dem Laufrade ist mit dem weiter im Abdampfrohr gemessenen völlig übereinstimmend.“ Es ist dies Ergebnis zwar nicht unerwartet, aber es verdient doch ausdrücklich hervorgehoben zu werden, da Bedenken geäußert wurden, ob der Dampf das Laufrad nicht noch mit einem, wenn auch kleinen Ueberdruck über den Dampf in der Abdampfeitung verlasse.“ Als Quelle dieser Bedenken ist dann meine Arbeit über Theorie der Dampfturbinen genannt, und Schütz scheint anzunehmen, dass er durch seine Versuche meine Anschauung widerlegt habe.

Nun verlässt aber der Dampf das Laufrad der Laval-Turbine mit einer absoluten Geschwindigkeit, die eine, bei den ausgeführten Schaufelwinkeln sogar verhältnismässig grosse *achsiale Komponente* besitzt. Trifft ein solcher Dampfstrahl gegen ein achsial angebrachtes Röhrchen, so muss er in diesem notwendigerweise eine *Druckerhöhung* erzeugen, wesentlich gleich, wie das Wasser in einer Pitot'schen Röhre. Wenn dagegen Schütz in seinem Röhrchen *keinen* Ueberdruck angezeigt erhält, so kann das nur daher rühren, dass es *überhaupt gar nicht von achsial bewegtem Dampfe getroffen worden ist*. Wahrscheinlich ist es an ungeeigneter Stelle angebracht gewesen, sodass es *neben* dem eigentlichen Dampfstrahle in ruhendem Dampfe ausmündete. Es wäre aber auch nicht ganz ausgeschlossen, dass vielleicht der Dampf bis zum Auftreffen auf die Ausmündung des Röhrchens seine Geschwindigkeit schon so weit verloren hatte, dass er keine bemerkbare Druckerhöhung mehr hervorbringen konnte.

Um den Seitendruck im freien Strahle messen zu können, hätte das Röhrchen vielmehr *radial* eingeführt werden sollen, sodass sich die Dampfteilchen parallel zu seiner Mündungsebene bewegt hätten. Hätte sich so ein Ueberdruck im freien Strahle ergeben, so hätte das allerdings bewiesen, dass auch im Austrittsquerschnitte des Laufradkanals noch ein Ueberdruck herrscht. Umgekehrt dürfte aber aus dem Fehlen eines Ueberdruckes im Röhrchen doch nicht auch auf das Fehlen eines Ueberdruckes im Austrittsquerschnitte geschlossen werden. Denn in einem solchen freien Strahle scheint sich ein beim Austritte noch vorhandener Ueberdruck sehr rasch auszugleichen; das folgt wenigstens aus Versuchen von Dr. R. Emden¹⁾ und seinen Vorläufern, Versuchen, auf die ich mich auch noch an einer späteren Stelle beziehen muss.

Wenn man ein solches radiales Röhrchen zu tief in den bewegten Strahl einführt, so sind allerdings auch Störungen in der natürlichen Bewegung des Dampfes in der Art möglich, dass an der Mündung des Röhrchens eine Saugwirkung auftritt. Dann sind Rückschlüsse auf den Druck im Austrittsquerschnitt überhaupt unzulässig.

Eine *unmittelbare* Messung dieses Druckes lässt sich bei einer arbeitenden Laval-Turbine wahrscheinlich gar nicht vornehmen. Diese Frage muss also einstweilen offen bleiben. Keinesfalls liefern aber die Versuche von Schütz einen Beitrag zu ihrer Lösung. Ich muss also nach wie vor, gestützt auf eigene Beobachtungen, an der Ansicht festhalten, dass beim Ausströmen einer elastischen Flüssigkeit in einen mit gleichartiger Flüssigkeit angefüllten Raum, der Druck in der Mündungsebene *stets grösser* bleibt, als der Druck der umgebenden, ruhenden Flüssigkeit. Bestärkt werde ich in dieser Ansicht noch dadurch, dass ich bei gelegentlichen früheren Versuchen auch beim Ausströmen von Wasser unter Wasser durch eine gut abgerundete Mündung in der Mündungsebene einen Ueberdruck gefunden habe.

Der zweite Punkt, den ich besprechen möchte, bezieht sich auf die Vorgänge in der divergenten Dampf Düse. Schütz hat in dieser Druckmessungen vorgenommen und

¹⁾ 1898, Bd. XXXI, S. 68 u. ff. und 1899, Bd. XXXIII, S. 102 u. ff.
²⁾ Buchdruckerei A. W. Schade, Berlin N. Schulzendorferstr. 26.

¹⁾ «Ueber die Ausströmungserscheinungen permanenter Gase» Habilitationsschrift. Leipzig, Johann Ambrosius Barth, 1899.

ausserdem den Dampfverbrauch gegenüber der gebremsten Leistung bestimmt. Aus dem Verlaufe seiner Versuchsergebnisse leitet er dann unter anderem folgenden Schluss her, Seite 20, links unten:

Nach diesen Beobachtungen scheint die Ansicht Fliegner's, die den Nutzen hoher Spannungen lediglich darin sucht, dass dann im Laufrad grösseres Druckgefälle herrscht, unhaltbar.

Ferner findet Schütz, dass zwar die divergenten Düsen, die für Arbeiten mit Kondensation berechnet waren, nicht so günstig wirkten, als die weniger divergenten Auspuffdüsen; er erklärt dieses Verhalten aber aus den *de Laval'schen* Anschauungen und sagt dann weiter, diese Thatsache „darf nicht als Beweis der Fliegner'schen Anschauung angeführt werden, dass die stärkere Konizität der Kondensationsdüsen unter allen Umständen schädlich wirkt“, Seite 20, rechts oben.

Unmittelbar darauf fährt er fort: „Hierzu ist allerdings zu bemerken, dass bei den obigen Erörterungen die Annahme zu Grunde gelegt wurde, der am Rande der Düse gemessene Druck sei der im ganzen Mündungsquerschnitt herrschende. Fliegner bestreitet dies, und deshalb ist dadurch, dass sich die obigen Anschauungen aus der Theorie *de Laval's* erklären lassen, doch andererseits die Fliegner'sche Ansicht, die eben die Grundlagen der Ueberlegung anzweifelt, nicht widerlegt“.

Zunächst möchte ich hier mit Befriedigung feststellen, dass Schütz selbst zugiebt, meine Auffassung der Vorgänge sei durch die Ergebnisse seiner Versuche „nicht widerlegt“. Bei meinen Versuchen habe ich den Druck an verschiedenen Stellen des Querschnittes, allerdings nur ausserhalb des divergenten Rohres, gemessen, dort aber auch im Inneren des Strahles stets einen Ueberdruck gefunden, der nach dem Rande zu abnahm. Bei stärkerer Konizität stellte sich am Rande sogar ein Unterdruck ein, der sich bis in das Innere des Rohres hinein erstreckte. Gestützt auf diese Beobachtungen bin ich zu der Ueberzeugung gekommen, dass auch in den inneren Rohrquerschnitten der Druck von der Mitte nach dem Rande zu abnehmen müsse. Die *de Laval'sche* Auffassung wird dagegen durch keinerlei unmittelbare Druckbeobachtungen begründet.

Bei der Herleitung seiner Ergebnisse schliesst Schütz auch aus einer unmittelbaren Vergleichung des Dampfverbrauches mit der Bremsleistung auf die Vorgänge in der Dampf Düse. Das erscheint aber doch gewagt, da Widerstände nicht nur in der Düse auftreten. Die von ihm beobachtete verhältnismässig raschere Zunahme des Dampfverbrauches bei den höchsten erreichten Leistungen könnte auch durch grössere Arbeitsverluste im Laufrade veranlasst sein. Es wäre aber auch möglich, weil die Düsen auf fast nur den vierten Teil des Umfanges zusammengedrängt waren, dass der einseitige Druck des Dampfes auf das Laufrad eine Ausbiegung der sehr dünnen Welle erzeugte, wodurch in den Lagern Klemmungen hervorgerufen und die Zapfenreibungswiderstände vergrössert werden mussten. Die verfügbaren Versuchsergebnisse gestatten aber keine, auch nur einigermaßen wahrscheinliche Entscheidung dieser Frage.

Ausser am Rande hat Schütz auch den Druck in der Düsenachse gemessen, und zwar angenähert in dem äussersten zur Achse senkrechten Querschnitte, der noch am ganzen Umfange Wandungen traf. Zu diesem Zwecke hat er ein gekrümmtes Röhrchen angewendet, das in einer Durchmesser ebene abgeschnitten war. Der so beobachtete Druck zeigte einen eigentümlichen Verlauf. Mit wachsendem Gesamtüberdrucke war der Druck in der Düsenachse gegenüber dem Drucke im Turbinengehäuse anfänglich wenig grösser, dann folgten einige Wellen, deren Thal einem etwas kleineren Druck entsprach, während in den Wellenbergen grösserer Druck herrschte, und zwar so, dass die Höhe jedes folgenden Berges grösser war, als die des vorhergehenden. Bei grösseren Ueberdrücken blieb der Druck in der Rohrachse wieder kleiner als der umgebende Druck. Aus diesem „seltsamen Verhalten“ des Druckes in der Düsenachse schliesst Schütz auf eine „turbulente“ Bewegung des Dampfes in der Düse, ich habe aber keinen

Versuch von ihm gefunden, diese Turbulenz einigermaßen zu erklären.

Das scheint mir nun ganz leicht möglich, gestützt auf die vorhin schon erwähnten Versuche von *Emden*. Diese haben gezeigt, dass sich beim Ausströmen von Gasen: Luft, Wasserstoffgas und Kohlensäure, unter grösserem Ueberdruck im freien Strahle stehende, longitudinale Schallwellen ausbilden, deren Länge mit zunehmendem Ueberdrucke wächst. Ueberträgt man dieses Verhalten auf den Dampf, so hätte man es in der *de Laval'schen* Düse auch mit Schallwellen zu thun. Bei kleinerem Ueberdrucke sind allerdings noch keine solche Wellen vorhanden, und es ergibt sich daher stets ein Ueberdruck in der Düsenachse, ganz übereinstimmend mit meiner Auffassung der Vorgänge. Dass sich dann bei wachsendem Ueberdrucke in dem untersuchten Querschnitte zunächst ein Wellenbauch mit kleinerem Druck einstellt, muss als Zufall bezeichnet werden. Mit wachsender Länge der Schallwellen rückt dann abwechselnd ein Knoten und ein Bauch an das Messröhrchen heran, wobei der Druck in den Knoten mit zunehmendem Gesamtüberdrucke immer grösser wird.

Das schliesslich an dem Messröhrchen nur noch ein Unterdruck beobachtet wurde, lässt sich verschieden erklären. Die Wellen der Kurve: Druck in der Düsenachse in Funktion des Gesamtüberdruckes werden mit zunehmendem Ueberdrucke immer länger. Nun macht mir die letzte von Schütz auf Seite 17 gegebene Figur eher den Eindruck, als ob die Kurve schliesslich wieder ansteigen wollte. Wenn das richtig ist, so hätte man es bei dem grössten erreichten Ueberdrucke noch mit einem sehr flachen und langen Wellenthale zu thun, dem bei weiterer Druckzunahme wieder ein Berg folgen würde. Es wäre aber auch nicht undenkbar, dass sich das Messröhrchen schliesslich unter dem grösseren Drucke des rascher bewegten Dampfes etwas ausgebogen hat, sodass seine Endfläche etwas nach aussen zu gedreht worden wäre. Dadurch hätte sich dort eine Saugwirkung eingestellt, und der Druck hätte daher zu klein beobachtet werden müssen. Welche von diesen Erklärungen die richtige ist, muss ich dahin gestellt sein lassen.

Wenn der eigentümliche Verlauf des Druckes in der Düsenachse wirklich durch die Ausbildung von Schallwellen in der Düse veranlasst worden ist, und mir erscheint diese Erklärung als die natürlichste, so würde das beweisen, dass der Dampf in der Düse auch nur die Schallgeschwindigkeit erreicht. Dann würden aber die Schütz'schen Versuche nicht nur keine Stütze für die *de Laval'sche* Auffassung der Vorgänge in der Düse bilden, sondern sie würden sie sogar endgültig widerlegen. Es wäre damit eine beachtenswerte Uebereinstimmung in dem Verhalten des Dampfes und der Gase hergestellt.

Bei meinen Versuchen über das Ausströmen von Luft durch konisch divergente Rohre habe ich allerdings keinerlei Andeutung eines Auftretens von Schallwellen gefunden; der Druck in der Mitte des Strahles aussen verlief vielmehr stets so, dass sich etwaige Unstetigkeiten aus der Schwierigkeit einer genauen Messung glaubte erklären zu können. Jedenfalls deuteten diese Unstetigkeiten nicht auf gesetzmässige Schwankungen. Es scheinen also bei diesen Versuchen in der That keine Schallwellen vorhanden gewesen zu sein. Der Grund davon dürfte in der verhältnismässig grösseren Länge der von mir benutzten Röhren liegen, infolge welcher sich die Schallwellen entweder gar nicht ausbilden konnten, oder sich bis zum Austrittsquerschnitte schon wieder beruhigt hatten. Nur bei meiner damaligen Figur 16¹⁾, welche Versuche mit einem verkürzten Rohre darstellt, tritt eine eigentümliche Schwankung im Verlaufe des Druckes auf, die vielleicht durch entstehende Schallwellen verursacht ist, wenn das auch bei einem dazu eigentlich zu kleinen Ueberdrucke geschieht. Ich beabsichtige, diese Frage gelegentlich noch eingehender zu untersuchen.

Zürich, September 1901.

Prof. Dr. A. Fliegner.

¹⁾ Bd. XXXI S. 86.