

Zeitschrift: Die Eisenbahn = Le chemin de fer
Herausgeber: A. Waldner
Band: 12/13 (1880)
Heft: 18

Artikel: Ueber den Druckverlust der comprimierten Luft in langen Leitungen
Autor: Stockalper, E.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-8544>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 06.02.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

INHALT: Ueber den Druckverlust der comprimirtten Luft in langen Leitungen. — Chalet du prince Masséna, à Bellerive, au lac de Genève. — Electricisches Licht. — Revue. — Statistisches. — Vereinsnachrichten.

Ueber den Druckverlust der comprimirtten Luft in langen Leitungen.

Nach den von Ingenieur *E. Stockalper* angestellten Versuchen und veröffentlichten Resultaten.

In seiner hervorragenden Rede, mit welcher General Menabrea am 26. Juni 1857 das sardinische Parlament bewog, den Durchstich des Mont Cenis zu beschliessen, räumt derselbe dem Prof. Colladon die Ehre ein, als Erster die rationelle Idee gehabt zu haben, die Maus'sche Maschine statt durch Seiltransmissionen mittelst Anwendung comprimirtter Luft in Bewegung zu setzen. Angestellte Versuche hatten Prof. Colladon überzeugt, dass der Widerstand, welchem die Luft in langen Röhrenleitungen begegnet, viel geringer sei als bis dahin allgemein angenommen wurde und dass daher die Befürchtung, die comprimirtte Luft werde auf grosse Entfernung nicht geleitet werden können, ohne den grössten Theil ihrer Spannung zu verlieren, übertrieben erscheine. Gestützt auf Messungen, die in einer 700 m. langen, 0,25 m. im Durchmesser haltenden Leitung vorgenommen worden, gab er vielmehr schon im Jahre 1852 an, dass der gebräuchliche Coefficient für die Bewegung von gasförmigen Körpern in glatten Röhren zu stark sei und ungefähr um die Hälfte reducirt werden müsse.

Das Bedürfniss, sich Klarheit über diese Verhältnisse zu schaffen, hat den Oberingenieur der Favre'schen Unternehmung in Göschenen, Herrn Stockalper, dazu geführt, an der ihm zu Gebote stehenden langen Luftzuleitung für die Bohrmaschinen im Gotthardtunnel directe Messungen vorzunehmen und die Ergebnisse mit den Formeln, welche verschiedene Autoren geben, zu vergleichen. Im grossen Ganzen haben sich die Angaben Prof. Colladon's dabei bestätigt und wir sind nun durch dieses schätzenswerthe Material in der Lage, besagte Formeln richtig zu stellen, soweit es die practische Anwendung derselben wünschenswerth erscheinen lässt. Denn, wenn der ungestörte Fortgang der Arbeit und die physicalischen Mittel, welche Hr. Stockalper zur Verfügung standen, es nicht ermöglichten, bei den Beobachtungen jenen Grad der Genauigkeit zu erreichen, der bei physicalischen Messungen sonst vorausgesetzt wird, so fällt anderseits sehr in's Gewicht, dass die grosse Länge der Leitung (5122 m.), die beobachtet wurde, geeignet ist, solchen theilweisen Mangel an Präcision der einzelnen Messungen reichlich aufzuwiegen.

Der hauptsächlichste Grund, warum die gegebenen Formeln für die Beurtheilung der, bei der Transmission von Betriebskraft durch comprimirtte Luft Platz greifenden Verhältnisse nicht verwendbar erschienen, mag darin liegen, dass sie bei kurzen Leitungen, geringer Spannung und kleinem Volumen der beförderten Luft ermittelt wurden, während wir es hier gerade mit den entgegengesetzten Factoren zu thun haben.

Folgen wir nun dem Bericht des Ingenieurs Stockalper, den derselbe in einer Brochure herausgegeben hat. *)

Folgendes sind die Factoren, welche auf die Bewegung der comprimirtten Luft in Röhrenleitungen Einfluss haben:

1. Die Länge, der Durchmesser und die Natur der Leitung.
2. Die Geschwindigkeit der Bewegung der comprimirtten Luft, resp. das Volumen derselben, welches in einer Secunde durch einen gegebenen Querschnitt strömt.
3. Die Spannung der Luft in verschiedenen Punkten der Leitung.
4. Die Temperatur der Luft in der Leitung.

Dabei ist zu bemerken:

*) Expériences faites au tunnel du St-Gothard sur l'écoulement de l'air comprimé en longues conduites métalliques pour la transmission de forces motrices, par E. Stockalper, Ingénieur, chef de service de l'entreprise L. Favre & Co., Genève, imprimerie Charles Schuchardt.

ad 1. Die Leitung auf der Göschener Seite des Gotthardtunnels, an welcher beobachtet wurde, besteht aus:

4600 Längenmeter guss- oder schmiedeisernen Röhren von 0,20 m. Durchmesser.

522 Längenmeter schmiedeisernen Röhren von 0,15 m. Durchmesser. Bei den anderen Röhrenleitungen von 0,10 m. Durchmesser wurden wegen der häufigen Abzweigungen und Luftentnahmen keine Messungen vorgenommen. Die Verbindung der Röhren untereinander ist durch Flanschen und Schrauben hergestellt und durch Kautschukringe gedichtet.

Da die Leitung auf die ganze Länge dicht hält, so ist bei Bestimmung der durchströmenden Luftmenge auf Verluste keine Rücksicht genommen worden, ebenso wurden einige vorkommende Kniee, in Anbetracht der Länge der Leitung, ausser Betracht gelassen.

ad 2. Die Durchströmungsgeschwindigkeit wurde durch Zählung der Kolbenhübe der Compressoren festgestellt, indem ein vorhergegangener Versuch den Werth eines Kolbenhubes mit 166,5 cbm. angegeben hatte.

ad 3. Die Spannung der Luft in der Leitung wurde mittelst Bourdon'schen Manometern, welche Bewegungen von $\frac{1}{20}$ Atmosphäre noch abzuschätzen erlauben, aufgenommen. Für jedes dieser Manometer war durch Vergleiche mit einem Normalmanometer vorher eine Correctionscurve ermittelt worden.

ad 4. Die Temperaturen endlich wurden von Thermometern abgelesen, welche so angebracht waren, dass sie sich bis auf den oberen Theil der Scala ganz im Innern der Leitung befanden. Bei diesen Ablesungen trug man dem Einfluss Rechnung, welcher durch äusseren Druck auf den Thermometer ausgeübt wird und der für jedes Instrument durch Versuche festgestellt worden war.

Zur Vornahme der Versuche wurden nun gleichzeitig an acht verschiedenen Punkten der 5100 m. langen Leitung Manometer angebracht. Der letzte derselben befand sich bei 5100 m. noch weit von jeder Bifurcation der Leitungsröhre. Jeder Manometer wurde von zehn zu zehn Minuten abgelesen. Zur Vereinfachung werden jedoch hier nur die Manometer an den Hauptpunkten der Leitung, d. h. an jenen Stellen, wo der Durchmesser sich ändert, und ein vierter bei den Compressoren in Betracht gezogen.

Ferner trachtete man verschiedene constante Regime herzustellen, indem man durch Regelung des Ganges der Compressoren und durch weitere oder geringere Oeffnung des Ausströmungsrohres am Ende der Leitung bestrebt war, gleichzeitig ein constantes Volumen an comprimirtter Luft zu erzeugen und den Abfluss so zu regeln, dass für jeden Punkt der Leitung die Spannung durch einige Zeit nahezu dieselbe blieb.

Leider konnten die Temperaturbeobachtungen nicht gleichzeitig mit den Druckbeobachtungen angestellt werden, sie wurden jedoch später nachgeholt und man ist zu dem Schluss gekommen, dass diese Versäumniss für das Endergebniss durchaus ohne Folgen geblieben ist. Es wurden nämlich an verschiedenen Stellen im Innern der eisernen Röhren Thermometer angebracht, deren Ablesungen das merkwürdige Resultat ergaben, dass, trotzdem die Spannung der comprimirtten Luft von drei bis sechs Atmosphären und die Geschwindigkeit in der Leitung von 4 m. auf 12 m. schwankte, die Temperatur an jedem Punkt sozusagen constant blieb, indem die Differenz zwischen der höchsten und der niedrigsten Ablesung $\frac{1}{2}$ Grad nicht erreichte, und zwar hielt sich die Temperatur der comprimirtten Luft durchgehends auf drei Grad unter der Lufttemperatur des Tunnels, was annehmen lässt, dass sich die comprimirtte Luft sehr rasch der Temperatur der Umgebung anschliesst.

Die hauptsächlichst angewandte Formel, um den Druckverlust bei Bewegung von gasförmigen Körpern in Röhrenleitungen zu finden, ist, wenn p die mittlere Spannung des Gases, p_1 diejenige beim Eintritt, p_2 diejenige beim Austritt aus der Leitung, l die Länge der Leitung in Metern, D den Durchmesser in Metern, u die Geschwindigkeit in Metern pro Secunde, R die Constante des Mariotte'schen und Gay-Lussac'schen Gesetzes (für die atmosphärische Luft 29,269), T die mittlere Temperatur, δ die Dichtigkeit bedeutet:

$$p_1 - p_2 = \varphi \cdot \frac{l}{D} \cdot \frac{p}{RT} \cdot \frac{u^2}{2g}$$

oder da

$$\frac{p}{RT} = \delta$$

$$p_1 - p_2 = \varphi \cdot \frac{l}{D} \cdot \delta \cdot \frac{u^2}{2g}$$

worin nach Girard, d'Aubuisson, Pecqueur

$$\varphi = 0,024$$

nach Weisbach

$$\varphi = \frac{0,12}{\sqrt{u}}$$

zu setzen ist.

Morin gibt die Formel

$$p_1 - p_2 = \frac{u^2}{2g} \delta \left(1 + 0,0252 \frac{l}{D} \right)$$

Arson hat seine Tabellen berechnet nach der Formel

$$p_1 - p_2 = \frac{4l}{D} \delta (au + bu^2)$$

in welcher für unsere beiden Fälle

$$D = 0,20 \text{ m.}, a = 0,000330, b = 0,000395$$

$$D = 0,15 \text{ m.}, a = 0,000440, b = 0,000430$$

(Siehe Mémoires de la Société des Ingénieurs civils de France, 1867.)

Alle diese Formeln geben den Druckverlust in Kilogramm pro Quadratmeter, der, um den Vergleich zu erleichtern, in der nachfolgenden Tabelle durch Division mit 10334 in Atmosphären verwandelt worden ist.

Die Analogie, welche zwischen der Bewegung von Wasser und jener von Luft in Röhren besteht, legt den Gedanken nahe, die Formeln von Darcy für den Durchfluss von Wasser, welche sich durch ihre Einfachheit auszeichnen, hier mit in Betracht zu ziehen. Darcy berechnet seine Tabellen unter der Annahme, dass der Reibungswiderstand mit genügender Genauigkeit berücksichtigt sei durch die Formel

$$\frac{DJ}{2} = b_1 u^2$$

worin J den Druckverlust auf den laufenden Meter und b_1 ein Coefficient ist, der für Durchmesser von 0,0122 m. bis 0,50 m. gegeben wird durch die Formel

$$b_1 = 0,000507 + \frac{0,00001294}{D}$$

indem nun für das in einer Secunde durchfliessende Volumen Q gesetzt wird, gelangt Darcy nach mehrfachen Umformungen der obigen Formel zu dem einfachen Ausdruck

$$J = a Q^2$$

in der

$$a = 3,2423 \frac{b_1}{D^5}$$

(Die Werthe von a für $D = 0,01 \text{ m.}$ bis 1 m. hat Darcy für neue eiserne Röhren empirisch ermittelt.)

Führt man nun, um die Formel zu verallgemeinern, noch die Dichtigkeit (δ) ein, so kann man die Formel schreiben:

$$J = a Q^2 \delta$$

in welcher für Wasser $\delta = 1$ wäre, oder um den Ausdruck

auf Kilogramm zu reduciren $J = a_1 Q^2 \delta$, worin

$$a_1 = \frac{a}{1000}$$

Wir erhalten nun, wenn wir die Rechnung nach den verschiedenen Formeln ausführen und mit den Messungen vergleichen, untenstehende Tabelle, aus welcher ersichtlich ist, dass die gerechneten Druckverluste alle namhaft höher sind, als die direct gemessenen; dass der Coefficient Morin's wahrscheinlich auf die Versuche von d'Aubuisson, Girard et Pecqueur zurückzuführen ist; dass Weisbach besonders für kleine Geschwindigkeiten zu grosse Druckverluste angibt; dass Arson's Formel ähnliche Fehler gibt, wahrscheinlich weil sie sich nur auf Versuche bei niedrigem Druck basirt; dass schliesslich die von Ingenieur Stockalper angewendete Formel mit den Coefficienten, welche Darcy für die Bewegung des Wassers in Röhren angibt, Resultate liefert, die sich mehr als jene der anderen Formeln der Wirklichkeit nähern.

Von diesem letzten Ergebniss ausgehend, zieht Hr. Stockalper den Schluss, dass es genüge, den Druckverlust für Wasser unter denselben Bedingungen zu ermitteln, um nach Massgabe des Verhältnisses der Dichtigkeit des Wassers zu jener der comprimirt Luft auch die Druckverhältnisse für diese zu kennen, dass ferner mit grosser Wahrscheinlichkeit die Formel

$$J = a_1 Q^2 \delta$$

eine sowohl den tropfbar flüssigen Körpern, als auch den gasförmigen gemeinsame sei, welche Hypothese allerdings erst durch weitere Experimente zu erhärten wäre.

	Durchmesser in Metern D	Länge in Metern l	Durchflussvolumen in Cubikmetern bei 0°, und Barometerdruck von Paris V_0	Mittlerer Druck in Atmosphären $\frac{p_1 + p_2}{2}$	Mittlere Temperatur in der Leitung t_0	Gewicht pro Cubikmeter, resp. mittlere Dichtigkeit in Kg. δ	Durchflussvolumen bei mittlerer Dichtigkeit in Cubikm. Q	Mittlere Geschwindigkeit in Metern "	Druckverlust in Atmosphären von 1,0334 kg.					
									Beobachtet	Gerechnet nach der Formel				
										$J = a_1 Q^2 \delta$	Girard-d'Aubuisson Pecqueur	Morin	Arson	Weisbach
Erstes Regime	0,20	4 600	0,936	5,42	21 ⁰	6,500	0,185	5,89	0,36	0,57	0,61	0,64	0,90	1,25
	0,15	522	0,936	5,12	26,5	6,030	0,200	11,32	0,24	0,30	0,31	0,34	0,48	0,46
Zweites Regime	0,20	4 600	0,623	4,285	21	5,140	0,156	4,968	0,22	0,32	0,345	0,30	0,52	0,76
	0,15	522	0,623	4,095	26,5	4,820	0,166	9,394	0,07*)	0,17	0,175	0,19	0,27	0,29
Drittes Regime	0,20	4 600	0,520	3,745	21	4,490	0,149	4,747	0,19	0,25	0,27	0,29	0,41	0,63
	0,15	522	0,520	3,597	26,5	4,230	0,158	8,942	0,105	0,135	0,14	0,15	0,22	0,23

*) Wahrscheinlicher Beobachtungsfehler.