

Zeitschrift: Schweizerische Bauzeitung

Band: 63/64 (1914)

Heft: 7

Artikel: Versuche über Druckschwankungen in eisernen Rohrleitungen

Autor: Strickler, A.

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-31505>

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: 22.11.2024

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

INHALT: Versuche über Druckschwankungen in eisernen Rohrleitungen. — Amerikan. Dampflokomotiven grosser Leistung. — Neubauten in der Altstadt St. Gallen. — Miscellanea: Ozonisierung des Trinkwassers. Vom Kapp'schen Vibrator. Ehrung von Ingenieur R. Thury. Grenchenbergtunnel. Hauenstein-Basistunnel. — Nekrologie:

F. Stierlin. — Literatur: Das Werk. — Feuilleton: Von der XXXIII. Generalversammlung der Gesellschaft ehemaliger Studierender vom 11. bis 13. Juli 1914 in Bern, Festbericht.

Tafeln 11 und 12: Neubauten in der Altstadt St. Gallen.

Band 64.

Nachdruck von Text oder Abbildungen ist nur mit Zustimmung der Redaktion und unter genauer Quellenangabe gestattet.

Nr. 7.

Versuche über Druckschwankungen in eisernen Rohrleitungen.

Von Dipl.-Ingenieur A. Strickler,

Konstrukteur an der Eidg. Techn. Hochschule in Zürich.

Anschliessend an die Literatur-Besprechung in Nr. 25, Band LXIII dieser Zeitschrift, soll eine Reihe von Versuchen wiedergegeben und besprochen werden, die im Dezember 1913 in der hydraulischen Abteilung des Maschinenlaboratoriums der Eidgen. Technischen Hochschule, auf Anregung des Vorstandes dieser Abteilung, Professor Dr. Prášil, durchgeführt wurden. Es handelt sich um Druckschwankungsversuche an der 70 m langen, gusseisernen Turbinenrohrleitung; sie bildeten eine Uebung der Studierenden des obersten Semesters¹⁾. Es wurden für verschiedene Schliesszeiten und verschiedenen Wasserdurchfluss der zeitliche Druckverlauf bei vollständigen Schliess- und Oeffnungsbewegungen mittels Indikator aufgenommen, sowie die zeitliche Veränderung der Ausflussöffnung (rechteckige Düse einer Freistrahlturbine) aufgezeichnet.

Von einer grossen Reihe von solchen Versuchen wurde zunächst eine Anzahl Diagramme ausgewählt, bei denen die Veränderung der Ausflussöffnung zeitlich linear verlief. In Tabelle I (S. 86) sind alle den Originaldiagrammen entnommenen Daten eingetragen und die entsprechenden Verhältniswerte ρ , δ , $\frac{y_{max}}{y_0}$ und $\frac{y_{min}}{y_0}$ (vgl. Bd. LXIII, S. 357) berechnet. Die eingeklammerten Zahlen sind jeweils die sich nach der Theorie von Allievi ergebenden Werte, zum Vergleich mit den darüberstehenden Versuchswerten. Erstere, d. h. die theoretischen Werte, wurden aus der graphischen Tabelle (Abbildung 1) entnommen. Diese ist durch Umrechnung der Tabellen in der Allievi'schen Veröffentlichung: „Teoria del Colpo d'Ariete“ (Ceretti, Stucchi e Cia, Milano) entstanden; sie ist in dieser Form nach Ansicht des Verfassers für den praktischen Gebrauch bequemer und genauer.

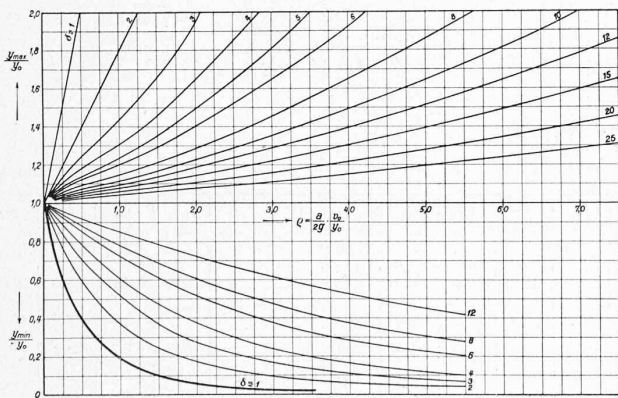


Abbildung 1.

Aus Reihe X der Tabelle I ist ersichtlich, dass die theoretischen Werte gut mit den Versuchswerten übereinstimmen; die Abweichungen dürften mit Ausnahme von Nr. 15 und 19 innerhalb des Bereiches der unvermeidlichen Messfehler liegen. Sodann erfährt die Allievi'sche Theorie eine weitere, sehr schöne Bestätigung in Bezug auf den

¹⁾ Ueber die Anordnung und Versuchseinrichtung hat Prof. Prášil in einem Vortrag vor dem Zürcher Ingenieur- und Architektenverein am 19. Februar 1908 berichtet; siehe S. B.-Z. 1908, Band LI, Seite 158.

qualitativen Verlauf der Druckkurven. Die Diagramme zeigen deutlich den Einfluss des die Form der Kurven bestimmenden Wertes von ρ , der von Allievi mit Recht als „Charakteristik“ bezeichnet wird.

Wie schon Dipl.-Ing. R. Dubs in der Uebersetzung und Ergänzung der ersten Allievi'schen Arbeit¹⁾ gezeigt hat, liefert die Theorie des Wasserstosses unter der Annahme eines starren Rohres und inkompressiblen Wassers denselben Wert des Druckes im Moment vollständigen Abschlusses, wie nach Allievi unter Berücksichtigung der Elastizitätsverhältnisse (zeitlich linearen Schliessvorgang vorausgesetzt). Ist nun der Wert $\rho > 1,5$, so ist der am Ende des Schliessvorganges auftretende Druck zugleich der höchste, der vorkommen kann. Ist aber $\rho < 1,5$, so kann der Maximaldruck noch beträchtlich grösser sein als der Druck zur Zeit des beendigten Schliessvorganges. Die Theorie des starren Rohres und inkompressiblen Wassers liefert dann in diesem Falle zu kleine Werte für den Maximaldruck (vergl. Abbildung 2 und Versuchsdiagramme Nr. 1 und 2, Abbildung 3, Seite 86).

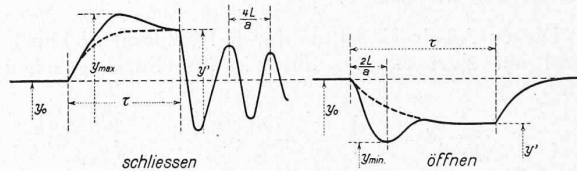


Abbildung 2.

Nach dieser Theorie ist:

$$\frac{y' - y_0}{y_0} = \pm n \left(\sqrt{1 + \frac{n^2}{4}} \pm \frac{n}{2} \right)^* \dots (1)$$

wobei

$$n = \frac{L v_0}{g y_0 \tau} = \frac{\rho}{\delta}$$

Führt man die Reihenentwicklung der Wurzel auf zwei Glieder durch, so ist auch:

$$\left. \begin{aligned} \frac{y' - y_0}{y_0} &\approx n + \frac{n^2}{2} + \frac{n^3}{8} \text{ für Schliessen} \\ &\approx -n + \frac{n^2}{2} - \frac{n^3}{8} \text{ für Oeffnen} \end{aligned} \right\} \dots (2)$$

In Reihe XIV der Tabelle I sind die entsprechenden Versuchswerte $\frac{y'}{y_0}$ ebenfalls eingetragen und mit den theoretischen verglichen (letztere eingeklammert).

Eine ebenso gute Uebereinstimmung mit der Allievi'schen Theorie wie für Schliessvorgänge zeigen auch die Versuche mit vollständigen Oeffnungsbewegungen (Inbetriebsetzung) des Abschlussorgans. Der grösste Druckabfall tritt hier immer am Ende des direkten Wasserstosses, also nach der Zeit $\frac{2L}{a}$ vom Beginn des Oeffnens an, auf; er ist daher grösser als nach Rechnung unter Annahme eines starren Rohres und inkompressiblen Wassers. Dagegen ergibt sich auch hier wieder der Druck am Ende der Oeffnungszeit τ nach beiden Theorien als gleich gross und ist auch in guter Uebereinstimmung mit den Versuchswerten (siehe Abbildung 2 und Tabelle I, Reihe XIV). Nach beendigttem Oeffnungsvorgang geht der Druck nach Allievi asymptotisch oder oszillatorisch in den neuen Beharrungs-

¹⁾ Allgemeine Theorie über die veränderliche Bewegung des Wassers in Leitungen (Springer, Berlin 1909), «Schweizer. Bauzeitung», Band LV, Seiten 278 und 296, eingehend besprochen durch Prášil.

^{*)} Diese Gleichung wurde von Prof. Dr. Prášil in seinen Vorlesungen an der Eidgen. Techn. Hochschule abgeleitet.

zustand über, je nachdem $\varrho >$ oder $<$ 1; auch dies findet seine Bestätigung durch die Versuche (siehe Diagramme, Versuche Nr. 2, 6, 16 und 20, Abbildung 3).

In den Diagrammen 21 und 22 (Abb. 3) ist endlich ein Fall für zeitlich nicht lineares Schliessen und Öffnen dargestellt. Die Schliess-, bzw. Öffnungsgeschwindigkeit war anfänglich kleiner, gegen Ende grösser. Die Durchrechnung nach der von Allievi angegebenen graphischen Konstruktion ergibt ziemlich gute Uebereinstimmung mit dem Versuch. Vergleichshalber wurde in Diagramm 21 auch die Druckkurve für lineares Schliessen punktiert eingetragen; es möge hier bemerkt werden, dass für letztern Fall der Maximaldruck kleiner wird als für jede andere Art des Schliessens in gleicher Zeit.

Die etwas grösseren Abweichungen der Versuchswerte $\frac{y_{max}}{y_0}$ in Nr. 15 und 19 von den berechneten führen darauf, auch den Einfluss der Widerstandshöhe der Rohrleitung (Reibung usw.) etwas näher zu untersuchen.

Wird mit y_s die statische Druckhöhe in Metern, mit y_0 wie früher der anfängliche Beharrungsdruck bezeichnet, so gilt unter der Annahme einer starren Rohrleitung und inkompressiblen Wassers nach Professor Dr. Braun die Beziehung (für Schliessen):

$$\frac{y_{max} - y_0}{y_0} = n \sqrt{\frac{y_s}{y_0}} \left(\sqrt{1 + \frac{n^2}{4} \cdot \frac{y_s}{y_0}} + \frac{n}{2} \sqrt{\frac{y_s}{y_0}} \right) \quad (3)$$

wobei wieder wie früher: $n = \frac{L v_0}{g y_0 \tau}$

Dieser Ausdruck kann durch Reihenentwicklung der Wurzel auf zwei Glieder auch in der Form geschrieben werden:

$$\frac{y_{max} - y_0}{y_0} = n \sqrt{\frac{y_s}{y_0}} + \frac{n^2}{2} \cdot \frac{y_s}{y_0} + \frac{n^3}{8} \sqrt{\left(\frac{y_s}{y_0}\right)^3} \quad (4)$$

Beachtet man den entsprechenden Ausdruck für $y' - y_0$ in Gleichung (1), so kann daraus die angenäherte Beziehung abgeleitet werden:

$$\left(\frac{y_{max} - y_0}{y_0}\right)_{Rbg.} \approx \left(\frac{y_{max} - y_0}{y_0}\right)_0 \cdot \sqrt{\frac{y_s}{y_0}} \dots \quad (5)$$

Der Ausdruck auf der linken Seite bedeutet den zu erwartenden Wert, der Klammerausdruck rechts den gerechneten ohne Berücksichtigung der Widerstandshöhe. Die Abweichungen dieser Näherungsformel von den exaktern Werten sind in Abbildung 4 graphisch dargestellt.

Diese Formel gilt vorerst nur für Werte von $\varrho >$ 1,5, wo der Maximaldruck am Ende des Schliessvorganges eintritt. Sie lässt sich aber auch ohne grossen Fehler auf

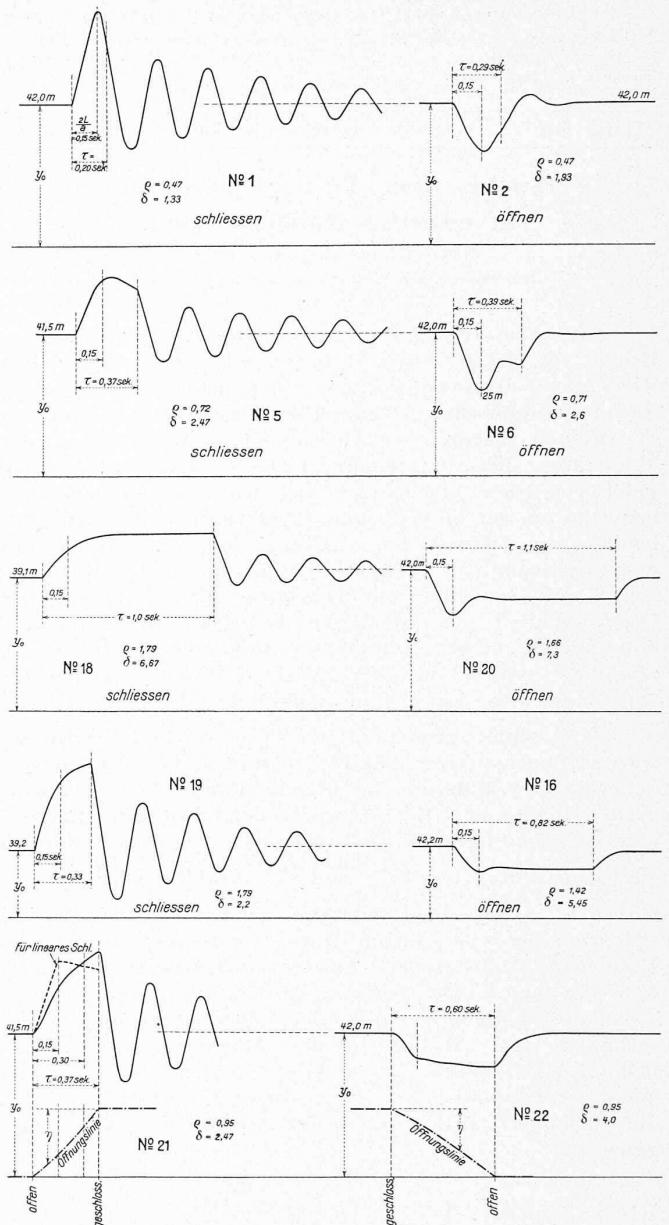


Abbildung 3.

Tabelle I. Druckschwankungsversuche.

$L = 70 \text{ m}$, $\frac{v_0 L}{a} = 0,15 \text{ sek}$ (beobachtet), daraus: $a = 930 \text{ m/sek}$.

| I | Versuch Nr. | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 |
|------|------------------------------|-----------|--------|-----------|-----------|-----------|---------|-----------|-----------|---------|-----------|--------|-----------|-----------|-----------|-----------|--------|-----------|-----------|-----------|--------|
| II | $v_0 \text{ m/sek}$ | 0,42 | | | | 0,63 | | | | 0,84 | | | 1,05 | | | 1,26 | | | | | 1,46 |
| III | | Schliess. | Öffnen | Schliess. | Schliess. | Schliess. | Öffnen | Schliess. | Schliess. | Öffnen | Schliess. | Öffnen | Schliess. | Schliess. | Schliess. | Schliess. | Öffnen | Schliess. | Schliess. | Schliess. | Öffnen |
| IV | y_0^m | 42,0 | 42,0 | 40,6 | 41,5 | 41,5 | 42,0 | 42,0 | 42,2 | 42,0 | 40,7 | 42,4 | 38,9 | 40,0 | 40,0 | 40,0 | 42,2 | 38,8 | 39,1 | 39,2 | 42,0 |
| V | y_{max}^m | 70,0 | — | 45,3 | 48,0 | 58,5 | — | 57,0 | 91,0 | — | 66,3 | — | 53,0 | 63,0 | 73,9 | 86,0 | — | 46,9 | 51,7 | 90,2 | — |
| VI | y_{min}^m | — | 27,7 | — | — | — | 25,0 | — | — | — | 24,6 | — | 29,0 | — | — | — | — | 27,6 | — | — | 28,0 |
| VII | $\tau \text{ sek}$ | 0,20 | 0,29 | 1,06 | 0,78 | 0,37 | 0,39 | 0,55 | 0,23 | 0,47 | 0,41 | 0,60 | 0,74 | 0,50 | 0,39 | 0,33 | 0,82 | 1,50 | 1,0 | 0,33 | 1,1 |
| VIII | ϱ | 0,47 | 0,47 | 0,73 | 0,72 | 0,72 | 0,71 | 0,95 | 0,95 | 0,95 | 1,23 | 1,18 | 1,54 | 1,50 | 1,50 | 1,50 | 1,42 | 1,80 | 1,79 | 1,79 | 1,66 |
| IX | δ | 1,33 | 1,93 | 7,0 | 5,2 | 2,47 | 2,6 | 3,7 | 1,53 | 3,13 | 2,73 | 4,0 | 4,95 | 3,33 | 2,60 | 2,20 | 5,45 | 10,0 | 6,67 | 2,20 | 7,3 |
| X | $\frac{y_{max}}{y_0}$ | 1,66 | — | 1,12 | 1,16 | 1,41 | — | 1,36 | 2,16 | — | 1,63 | — | 1,36 | 1,58 | 1,85 | 2,15 | — | 1,21 | 1,32 | 2,30 | — |
| | y_0 | [1,63] | — | [1,13] | [1,17] | [1,43] | — | [1,34] | [2,15] | — | [1,64] | — | [1,26] | [1,57] | [1,82] | [2,08] | — | [1,20] | [1,30] | [2,22] | — |
| XI | $\frac{y_{min}}{y_0}$ | — | 0,66 | — | — | — | 0,60 | — | — | 0,585 | — | 0,685 | — | — | — | — | — | 0,65 | — | — | 0,665 |
| | y_0 | — | [0,62] | — | — | — | [0,57] | — | — | [0,555] | — | [0,65] | — | — | — | — | — | [0,60] | — | — | [0,63] |
| XII | $n = \frac{\varrho}{\delta}$ | 0,354 | 0,243 | 0,104 | 0,14 | 0,292 | 0,273 | 0,257 | 0,62 | 0,304 | 0,45 | 0,295 | 0,31 | 0,455 | 0,58 | 0,68 | 0,26 | 0,18 | 0,269 | 0,815 | 0,227 |
| XIII | y'^m | — | — | — | 54,5 | 32,3 | — | — | 81,0 | 30,7 | 62,0 | 30,5 | 53,0 | — | 67,2 | — | 29,5 | 46,9 | 51,7 | 90,2 | 32,7 |
| XIV | $\frac{y'}{y_0}$ | [1,42] | [0,79] | [1,11] | [1,15] | [1,33] | [0,765] | [1,29] | [1,84] | [0,74] | [1,55] | [0,78] | [1,36] | [1,57] | [1,77] | [1,95] | [0,78] | [1,20] | [1,30] | [2,22] | [0,80] |

Fälle übertragen, wo $\rho < 1,5$, solange gleichzeitig der Wert δ nicht wesentlich grösser wird als etwa 2 bis 3. Ist letzteres dagegen der Fall, tritt der Maximaldruck also schon in der ersten Hälfte der Schliessperiode ein, so hat sich auch die Widerstandshöhe erst teilweise vermindert, und ihr Einfluss kann daher für technische Rechnungen ganz vernachlässigt werden.

Laut Zahlentabelle II stimmen nun auch die Versuche 15 und 19 besser mit den gerechneten Werten überein, wenn der Einfluss der Widerstände mit obiger Gleichung berücksichtigt wird.

Dazu ist allerdings zu bemerken, dass für technische Rohrleitungen der Wert $\frac{y_s}{y_0}$ nicht bedeutend von 1 abweichen wird, insofern die Leitung wirtschaftlich sein soll (selten über 1,10); ferner darf auch $\frac{y_{max} - y_0}{y_0}$ nicht über ein bestimmtes Mass steigen, wenn der Betrieb ein sicherer und anstandsloser sein muss (etwa 0,25 bis 0,30 für hydraulische Kraftzentralen); der Einfluss der Reibungshöhe auf den Wert y_{max} ist somit von geringer Bedeutung und kann für technische Berechnungen ganz vernachlässigt werden (siehe Abbildung 4).

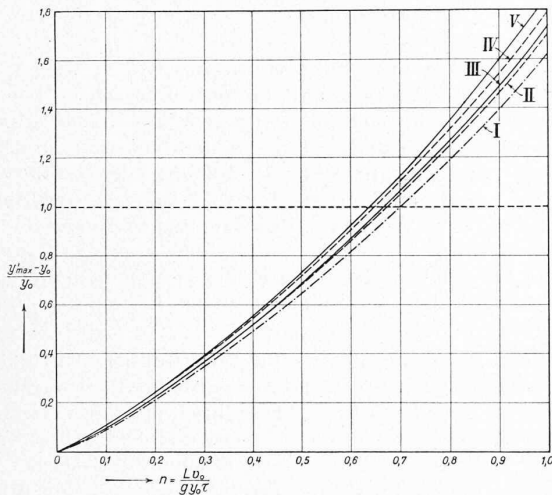


Abbildung 4.

Von noch geringerem technischem Interesse ist die dämpfende Wirkung der Widerstände auf die Druckschwingungen nach beendigem Schliessvorgang. Aus den Versuchen ergibt sich, dass für die betreffende Leitung die Ausschläge ungefähr nach einer geometrischen Reihe abnehmen.

Bezüglich der Zeitintervalle $\frac{2L}{a}$ oder der Perioden $\frac{4L}{a}$ ist zu bemerken, dass sich diese Werte aus allen Diagrammen gleich gross ergaben. Bei der verhältnismässig kleinen angewandten Vorschubgeschwindigkeit des Papierstreifens

Tabelle II.

| Versuch Nr. | 14 | 15 | 17 | 18 | 19 |
|---|------|------|-------|-------|------|
| y_0^m | 40,0 | 40,0 | 38,8 | 39,1 | 39,2 |
| y_s^m | 42,0 | 42,0 | 42,0 | 42,0 | 42,0 |
| $\frac{y_s}{y_0}$ | 1,05 | 1,05 | 1,085 | 1,075 | 1,07 |
| $\left(\frac{y_{max}}{y_0}\right)_{theoret.}$ | 1,82 | 2,08 | 1,20 | 1,30 | 2,22 |
| $\left(\frac{y_{max}}{y_0}\right)_{Rbg.}$ | 1,84 | 2,11 | 1,21 | 1,31 | 2,27 |
| $\left(\frac{y_{max}}{y_0}\right)_{Versuch}$ | 1,85 | 2,15 | 1,21 | 1,32 | 2,30 |

Bemerkung. Die Widerstandshöhe von 2,8 bis 3,2 m bei den Versuchen 17, 18 und 19 bestand nur zum kleinern Teil aus Rohrreibung, zum grössern aber aus Ortswiderständen (Krümmern, Schiebern usw.), die aber auch vom Quadrat der Durchflussgeschwindigkeit abhängig sind.

am Indikator und der sehr kleinen absoluten Grösse von $\frac{4L}{a} = 0,30 \text{ sek}$ liess sich ein Unterschied in dieser Dauer nicht herausmessen; nach der Theorie wären jedoch gedämpfte Schwingungen nicht mehr isochron, wenn die dämpfende Kraft proportional dem Quadrat der Geschwindigkeit ist.

Auf eine rein rechnerische Bestimmung der Fortpflanzungsgeschwindigkeit a nach der Gleichung

$$a = \frac{9900}{\sqrt{48,3 + k \frac{D}{d}}} \text{ *)}$$

muss hier verzichtet werden, weil einerseits die Materialkonstante k des Rohres zu unsicher ist, und ferner der Einfluss der Rohrverbindungen nicht gut mathematisch formuliert werden kann. Der Versuch ergab $a = 930 \text{ m/sek}$.

An dieser Stelle sei auch hingewiesen auf die Versuche von Herrn Professor Neeser an einer Hochdruckrohrleitung aus Schmiedeseisen für 345 m Gefälle, und auf die Versuche an der Rohrleitung der Anlage Ackersand¹⁾ für 720 m Gefälle. Beide ergaben in dem dort möglichen Bereich der Messgenauigkeit eine schöne Bestätigung der Allievi'schen Theorie für lange, schmiedeiserne Rohrleitungen, während die oben beschriebenen Versuche zeigen, dass auch für kurze, gusseiserne Leitungen die Mitberücksichtigung der Elastizität des Rohrmaterials und der Flüssigkeit durchaus gerechtfertigt ist.

Amerikan. Dampflokomotiven grosser Leistung.

Im Jahre 1912 sind von der American Locomotive Co. in Schenectady, N.-Y., zwei Versuchslokomotiven für die Pennsylvania-Eisenbahn gebaut worden, deren bedeutende Abmessungen und sonstige Eigentümlichkeiten hier kurz erwähnt zu werden verdienen.

1. Schnellzugslokomotive, Bauart „Pacific“, Klasse K 29 s.

Die seit mehr als einem Jahrzehnt in Amerika für die Beförderung schwerer Schnellzüge verwendete Pacific-Lokomotive hat zufolge der immer höhern Anforderungen des Verkehrs ein stets fortschreitendes Anwachsen ihrer Abmessungen erfahren. Dem Verlangen nach höherer Leistung suchte man auf möglichst einfachem Wege gerecht zu werden. Die Einführung der Vierzylinder-Verbundlokomotive, der sog. „balanced compound engine“, stiess auf mehrfache Schwierigkeiten, die es mit Ausnahme einer einzigen Bahngesellschaft überall bei Versuchsobjekten bewenden liessen. Als nun die Vorteile der Anwendung hochüberhitzten Dampfes im Lokomotivbetriebe auch von den amerikanischen Bahnen erkannt wurden, neigte man noch mehr zur Vervollkommnung der Kraftquelle, des Kessels, um dann den erzeugten Heissdampf auf eine möglichst einfache Maschine mit zwei gleichen Zylindern arbeiten zu lassen. Dieses Vorgehen hat in Amerika bis auf den heutigen Tag Nachahmung gefunden; dadurch ist die dreigekuppelte Lokomotive für schwere Schnellzüge mit Beibehaltung der Zwillingmaschine zu derart erstaunlicher Grösse angewachsen, dass eine weitere Verbesserung wohl nur noch durch Wiederaufnahme der Versuche mit Vierzylinder-Lokomotiven dieses Typs unter gleichzeitiger Anwendung des Heissdampfes angestrebt werden kann.

Die zweizylindrige Schnellzugs-Zwilling-Lokomotive der Pennsylvania R. R., deren hauptsächliche Grössenverhältnisse aus der nachstehenden Zusammenstellung ersichtlich sind, stellt bis dahin die grösste, schwerste und zugleich leistungsfähigste Lokomotive dieses Typs dar. Wie lange dieselbe jedoch die erste Rangstufe noch einnehmen wird, bleibt abzuwarten; soviel mag sicher sein, dass eine noch zu bauende Lokomotive des gleichen Typs, der ihr den Rang streitig machen soll, für den Lokomotivbauer hinsichtlich der Gewichte und Abmessungen recht interessant zu werden verspricht.

*) Siehe Allievi-Dubs, «Allgemeine Theorie über die veränderliche Bewegung des Wassers in Leitungen», Seite 19.

1) Siehe «Bulletin technique de la Suisse Romande» 1910.