

# Versuche über die Strömungsverhältnisse an der Austrittskante eines vereinfachten Dampfturbinen-Leitschaufel-Modelles

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

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizerische Bauzeitung**

Band (Jahr): **95/96 (1930)**

Heft 24

PDF erstellt am: **25.04.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-44011>

## 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.

INHALT: Versuche über die Strömungsverhältnisse an der Austrittskante eines vereinfachten Dampfturbinen-Leitschaufel-Modelles. — Die interstaatlichen Brücken zwischen New York und New Jersey. — Wald- und Hochwasserschutz. — Wettbewerb für ein Kunst- und Konzerthaus in Luzern. — Mitteilungen: Die Funkstation des „Graf Zeppelin“ und ihre Neuerungen. Vom neuen Rangierbahnhof Basel

S. B. B. Basler Rheinhafenverkehr. Neue Hochdruck-Dampfanlage. Die Studiengesellschaft für Automobilstrassenbau. Der schweizerische Städtetag 1930. Schweizerischer Techniker-Verband. — Nekrologe: Carl Müller. Emile Paschoud. — Wettbewerbe: Protestantische Kirche in Bowil (Bern). — Literatur. — Mitteilungen der Vereine: Sektion Bern.

Band 95

Der S. I. A. ist für den Inhalt des redaktionellen Teils seiner Vereinsorgane nicht verantwortlich. Nachdruck von Text oder Abbildungen ist nur mit Zustimmung der Redaktion und nur mit genauer Quellenangabe gestattet.

Nr. 24

## Versuche über die Strömungsverhältnisse an der Austrittskante eines vereinfachten Dampfturbinen-Leitschaufel-Modelles.

Von Prof. Dr. A. STODOLA, Zürich.

Die Versuche des englischen „Steam Nozzle Research Committee“ haben bekanntlich erwiesen, dass durch Abschragung (chamfering) des Leitkanalsteges am Austritt die Strömzahl<sup>1)</sup>,  $\varphi$  d. h. das Verhältnis der wirklichen zur theoretischen Ausflussgeschwindigkeit, erheblich verbessert werden kann. Man war aber wenig unterrichtet über die dabei herrschenden Strömungsverhältnisse. Wir teilen daher im folgenden einige Beobachtungen mit, die wir hierüber, dank dem Entgegenkommen der A.-G. der Maschinenfabriken Escher Wyss & Cie., Zürich, in deren Strömungs-Laboratorium anstellen konnten.

Die Versuchseinrichtung bestand aus einem Gebläse, durch das in einem Rohr von 200 mm l. W. eine Stromgeschwindigkeit von bis 50 m/s erzeugt werden konnte. In das Ende des Ausflussrohres wurde eine 5 mm dicke polierte Platte diametral eingefügt, die innen abgerundet war, aussen zunächst stumpf belassen und nachher beidseitig auf eine Länge von 30 mm so abgeschrägt wurde, dass der halbe Winkel an der entstehenden scharfen Kante  $5^\circ$  betrug. Die Platte ragte um 20 mm über das Rohrende

<sup>1)</sup> Abkürzender zweisilbiger Bezeichnungsvorschlag für den neun-silbigen Ausdruck „Geschwindigkeitskoeffizient“.

hervor. Zur Beobachtung des Gesamtdruckes diente ein Staurohr von 0,5 mm l. W., 0,7 mm Aussendurchmesser. Der statische Druck wurde durch ein vorne geschlossenes, mit geschlossener Spitze versehenes Röhrchen von 0,8 mm Aussendurchmesser bestimmt, das 3,0 mm vom Ende mit einer durchgehenden Bohrung von 0,5 mm versehen war.

Abb. 1 zeigt den Gesamtdruck längs eines Durchmessers vor dem Einbau der Platte, Abb. 2 den Verlauf des Gesamtüberdruckes  $\Delta p_g$  und des Unterschiedes  $\Delta p_g - \Delta p_s$  d. h. des dynamischen Druckgefälles nach Einbau der Platte längs eines zur Platte senkrechten Durchmessers bei stumpfem Ende in 0,3 mm (axial gemessenem) Abstand des Staurohrendes, Abb. 3 den Verlauf des statischen Unterdruckes  $\Delta p_s$  längs der Mittelebene der Platte.

Wie ersichtlich, stellt sich hinter der Plattenkante ein erheblicher Unterdruck ein, der nach Durchschreitung eines eigentümlichen Höckers erst knapp am Plattenende auf Null herabsinkt. Der Grund hierfür liegt offenbar im Mitreissen von Luft in die durch die stumpfe Kante verursachte Lücke und dem Widerstand, den die an den Enden in die Lücke nachdringende Luft im engen Hohlraum erfährt. Die von Tollmien mit Erfolg durchgeführte Berechnung der turbulenten Vermischung eines Strahles mit seiner Umgebung würde die Mittel an die Hand geben, die Grösse des entstehenden Vakuums vorauszubestimmen. Wir behalten uns vor, hierauf wie auch auf die Ermittlung der Krümmungshalbmesser der Strombahnen später zurückzukommen.

Bei abgeschrägtem Stege zeigt Abb. 4 den Verlauf des Gesamtüberdruckes  $\Delta p_g$  und des Geschwindigkeitsdruckgefälles  $\Delta p_g - \Delta p_s$  längs des zur Platte senkrechten Durchmessers in 0,3 mm Abstand von der Kante; Abb. 5 desgl. längs der Kante. Aus diesen Schaubildern wollen wir vorderhand die durch den Steg bewirkten Energieverluste ermitteln. Wir beschränken uns auf die Umgebung der Plattenmitte, wo wir die Strömung bis zum Erreichen des ungestörten Gebietes auf eine Breite  $\Delta' = 30$  mm als *ebene* betrachten dürfen.

Es bedeute:

$\Delta p_g = p_g - p_a$ : den Ueberdruck des mit dem Staurohr gemessenen Gesamtüberdruckes über die Atmosphäre;  
 $\Delta p_s = p_s - p_a$ : den Ueberdruck des statischen Druckes.

Die Geschwindigkeit in irgend einem Punkte ist

$$w = \sqrt{\frac{2g}{\gamma} (\Delta p_g - \Delta p_s)} \quad (1)$$

Ist  $\Delta p_t$  der Gesamtüberdruck-Ueberdruck im ungestörten Gebiet, so wird die theoretische Geschwindigkeit in irgend einem Punkt

$$w_t = \sqrt{\frac{2g}{\gamma} (\Delta p_t - \Delta p_s)} \quad (2)$$

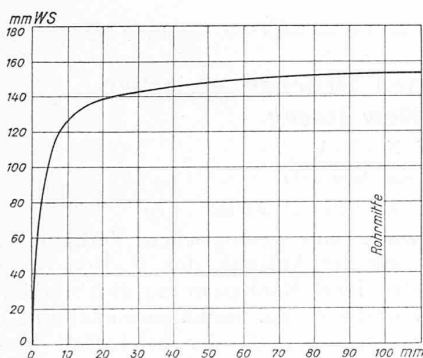


Abb. 1. Gesamtdruck längs eines Durchmessers vor dem Einbau der Platte.

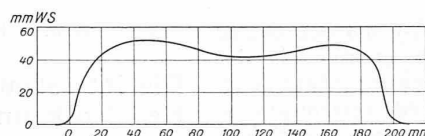


Abb. 3. Gesamtüberdruck längs der Mittelebene der stumpfen Platte.

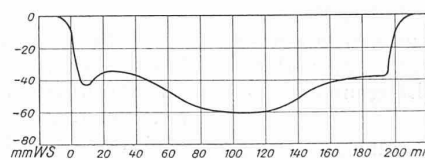


Abb. 5. Gesamtüberdruck längs der Kante der zugeschärften Platte.

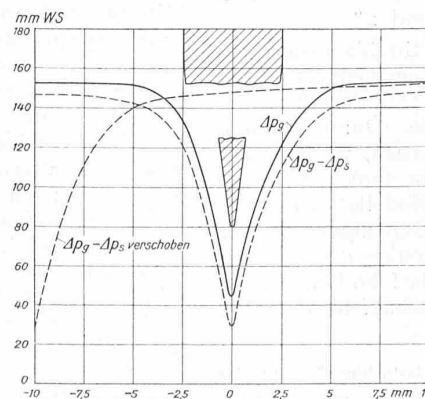
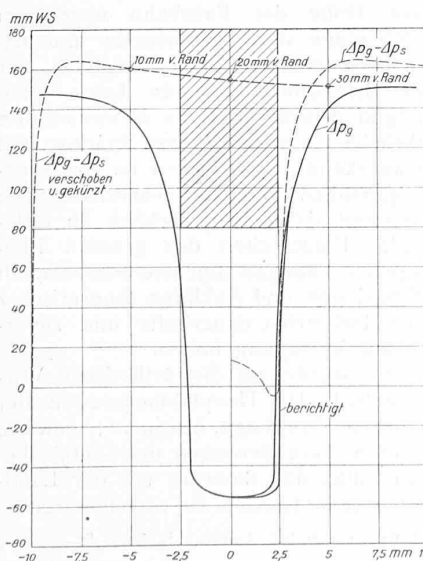


Abb. 4. Gesamtüberdruck und dynamisches Druckgefälle bei zugeschärfter Platte.

Abb. 2 (links). Gesamtüberdruck und dynamisches Druckgefälle nach Einbau der stumpfen Platte von 5 mm Dicke.

Der kinetische Energieverlust für 1 kg der durchströmenden Menge ist dann an der betrachteten Stelle

$$Z = \frac{w_t^2 - w^2}{2g} = \frac{\Delta p_t - \Delta p_g}{\gamma} \quad (3)$$

Um den Gesamtverlust zu bestimmen, benützt man am besten die als „Stromenergie“ bezeichnete Grösse<sup>1)</sup>

$$W = \int_0^F dG \left[ \frac{w^2}{2g} + \int_{p_0}^p v dp \right] \quad \text{mit} \quad dG = df w \gamma \quad (4)$$

Aus dieser thermodynamischen Gleichung (die eine Konstanz der Temperatur, wie die üblichen „hydraulischen“ Gleichungen, nicht voraussetzt) berechnet sich die zwischen zwei Querschnitten  $F_1, F_2$ , geleistete Gesamtreibungsarbeit als

$$A_r = \int_0^{F_1} - \int_0^{F_2} = W_1 - W_2 \quad (5)$$

Bei stärkeren Entspannungen würde hierin allerdings die Bestimmung des Integrals  $\int v dp$  Schwierigkeiten machen, da man, um die Abhängigkeit des  $v$  von  $p$  zu ermitteln, die „Wärmegleichung“ mit heranziehen müsste. Im vorliegenden Fall sind die Druckänderungen so klein, dass die Annahme  $v = \text{unveränderlich}$  erlaubt ist, obschon die Aenderungen von  $v$  von gleicher Grössenordnung sind, wie die von  $p$ . [Man kann in der Tat den Unterschied der Druck-

glieder in Gleichung (5) als  $\int dG \left[ \int_{p_1}^{p_2} v dp - \int_{p_2}^{p_1} v dp \right] = \int dG \int_{p_2}^{p_1} v dp$  schreiben, wobei für alle Punkte  $\int_{p_2}^{p_1} v dp = v_0 (p_1 - p_2)$  mit

unveränderlichem  $v_0$  gilt.] Somit lautet Gl. (5) ausführlicher, da sich das Integral  $\int v_0 p_0 dG$  in beiden Gliedern weghebt, indem man statt dessen  $\int v_0 p_a dG$  als + und – hinzufügt,

$$A_r = \int_0^{F_1} \left( \frac{w_1^2}{2g} + v_0 \Delta p_{s_1} \right) w_1 \gamma df - \int_0^{F_2} \left( \frac{w_2^2}{2g} + v_0 \Delta p_{s_2} \right) w_2 \gamma df \quad (6)$$

Die Reibungsarbeit ist, wie bekannt<sup>2)</sup>, um den Betrag der wiedergewinnbaren Reibungswärme grösser als der kinetische Energieverlust gegenüber reibungsfreier Strömung. In unserem Falle ist dieser Unterschied verschwindend klein. Im Integral (6) sind beide Glieder auf das gleiche Gesamtgewicht  $G$  i. d. sec. zu beziehen. Die Integrationsbreite wird zweckmässig bis zu dem Punkt auszudehnen sein, wo der statische Ueberdruck verschwindet. Wir haben in der Mündungsebene eine Breite von 30 mm in Betracht gezogen. Wenn mehr Beobachtungen vorlägen, verlohnte es sich, die Verluste absolut auf die Längeneinheit der Stegkante umzurechnen.

Eine vorläufige Auswertung mit Benützung weiterer Beobachtungen, die hier noch nicht aufgenommen werden konnten, bei welchen die Eintrittskante zugeschärft war, ergab als Energieverlust bei stumpfer Austrittskante rund 5%, bei zugeschärfter Austrittskante rund 2%.

Diese Zahlen beweisen, dass eine Strahlablösung bei der zugeschärften Schaufel, wie man „dem Gefühle nach“ erwarten könnte, nicht eingetreten ist, so dass sich die Zuschärfung günstig auswirken konnte. Durch weitere Versuche soll die Grenze festgestellt werden, von welcher ab ein Wirbel-Totraum sich zu bilden beginnt. Auch die Ausdehnung der Untersuchung auf Modelle wirklicher Leitschaukeln ist geplant, denn die Genauigkeit dieser Messungsart lässt sich wohl über diejenige der Gesamtimpuls-Bestimmung steigern, und man darf hoffen, für die Beurteilung der Dampfwirkung in Leitschaukeln nützliche Gesichtspunkte zu gewinnen.

<sup>1)</sup> Siehe deren Ableitung in „Dampf- und Gasturbinen“ S. 33. Da hier die innere Reibung eine massgebende Rolle spielt, sei auf die Begründung der Energiegleichung auf S. 881 und insbesondere S. 883 auf den zweiten Absatz von oben hingewiesen. Hier sind die Voraussetzungen, auf denen die Ableitungen S. 30 beruhen, näher präzisiert und zugleich die strenge Richtigkeit der auf Seite 30 vereinfacht abgeleiteten Ergebnisse dargetan.

<sup>2)</sup> „Dampf- und Gasturbinen“, S. 44.

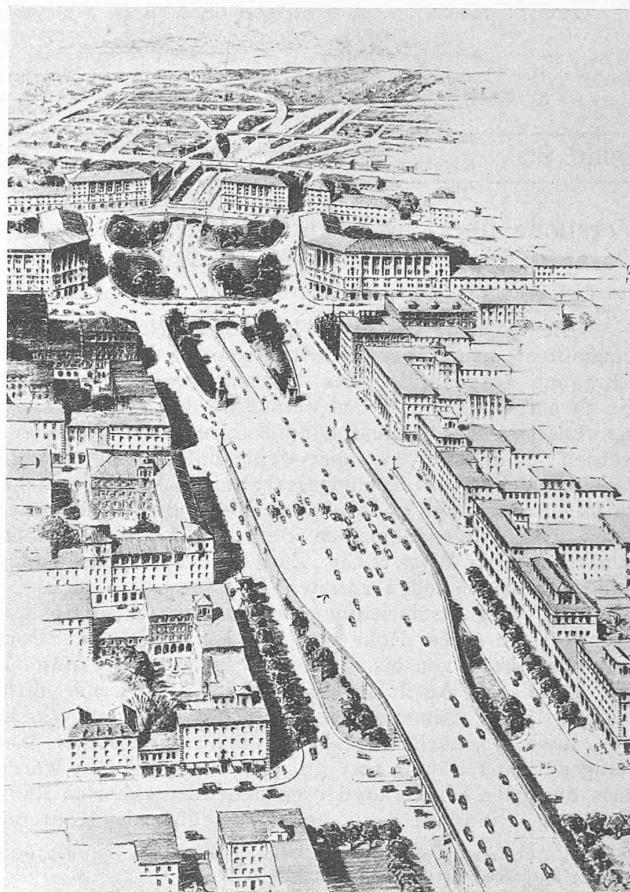


Abb. 5. Zufahrt zur Brücke auf dem westlichen Ufer, Seite Jersey City.

## Die interstaatlichen Brücken zwischen New York und New Jersey.

Von Ing. O. H. AMMANN, New York.

(Fortsetzung statt Schluss von Seite 288).

### III. DIE BRÜCKE ÜBER DEN HUDSON RIVER.

Die geographischen und geologischen Verhältnisse beschränkten die Lösung der Aufgabe, den Hudson River im nördlichen Teil der Insel Manhattan zu überbrücken, schon zu Beginn der Vorarbeiten auf bestimmte Richtlinien.<sup>1)</sup> Die Lage des Bauwerkes, innerhalb der behördlich festgelegten Grenzen, ergab sich aus dem Verlauf der beiden Ufer. Die grosse Breite des Flusses und der Verlauf der Felsformation bestimmten die grosse Spannweite der Mittelloffnung, während die Höhe der Fahrbahn über dem Wasserspiegel der Höhenlage der bestehenden Zufahrtsstrassen angepasst werden musste. Beim Vergleich der Kosten verschiedener Brückenarten waren keine weitgehenden Untersuchungen erforderlich; die ökonomischen Vorteile einer Hängebrücke für derart grosse Spannweiten sind heute allgemein anerkannt, dazu kamen im vorliegenden Falle noch die günstigen lokalen Verhältnisse. Die technische Aufgabe bestand daher hauptsächlich im rationalen Ausarbeiten aller Einzelheiten des grossen Bauwerkes. Die Werkzeuge der heutigen Ingenieurwissenschaft erlaubten ein tiefes Eindringen und Abklären theoretischer Probleme, während die Industrien dauerhafte und zuverlässige Baumaterialien zur Verfügung haben.

Besonderes Gewicht wurde auf die ästhetische Wirkung des Bauwerkes gelegt. Die Hauptabmessungen der Brücke waren wohl durch ihre Lage bestimmt; gewisse Teile jedoch, wie Pylonen, Verankerungen und Zufahrten, gaben Möglichkeiten in Fülle, das Bauwerk mit der Landschaft zu einem harmonischen Ganzen zu verschmelzen.

<sup>1)</sup> Vergl. die Ausführungen von Ing. Ammann in Band 85, Seite 7 (3. Januar 1925). Red.