

**Zeitschrift:** Schweizerische Bauzeitung  
**Herausgeber:** Verlags-AG der akademischen technischen Vereine  
**Band:** 109/110 (1937)  
**Heft:** 17

## **Inhaltsverzeichnis**

### **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:** 18.03.2025

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

INHALT: Aerodynamische Versuchsanlagen für hydraul. Maschinen. — Zur heutigen Einweihung des Etzelwerkes. — Ein Hallenstadion für Zürich. — Mitteilungen: Eidgen. Technische Hochschule. Sperrschicht-Photozellen. Die «Schweizerwoche». Gummi im Maschinenbau. — Wett-

bewerbe: Seeufer-Gestaltung in Zürich. Ausbau des Niveauberganges der SBB in Territet. — Nekrolog: Heinrich Zoelly-Veillon. — Literatur. — Mitteilungen der Vereine. — Schweizer Verband für die Materialprüfungen der Technik — Sitzungs- und Vortrags-Kalender.

Band 110

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. 17

### Aerodynamische Versuchsanlagen für hydraulische Maschinen

Von Obering. Dr. C. KELLER, Escher Wyss, Zürich

Wasser und Luft wurden im praktischen Maschinenbau von jeher als zwei ganz verschiedene Arbeitsmittel behandelt. Die Inkompressibilität der Flüssigkeit erlaubte eine spezielle theoretische Behandlung der hydraulischen Probleme bei Wasserturbinen und Pumpen, während bei Dampf- und Gasturbinen und im Verdichterbau die Zusammendrückbarkeit des Strömungsmediums als eine ausschlaggebende Eigenschaft stets berücksichtigt werden musste. Demzufolge entwickelten sich die Hydrodynamik und die Gasdynamik im Laufe der Zeit zu zwei grossen selbständigen Forschungsgebieten, die nach der landläufigen Ansicht des Technikers wenige Berührungspunkte haben. Bis vor kurzem gingen daher auch hydraulisch und kalorisch geschulte Ingenieure im allgemeinen verschiedene Wege bei Berechnung, Konstruktion und experimenteller Erforschung ihrer Maschinen.

Bei oberflächlicher Betrachtung scheint nun ja wirklich zwischen Flüssigkeit und Gas mit endlicher Kompressibilität ein grundsätzlicher Unterschied zu bestehen. Die mehr physikalische Betrachtungsweise der Strömung in beiden Fällen lehrt uns jedoch, dass je nach dem zulässigen Grad der Vernachlässigung die Unterschiede im Maschinenbau oft gar nicht von der im allgemeinen erwarteten Grösse sind. Wenn bei Bewegungen gasförmiger Medien die Strömungsgeschwindigkeit verhältnismässig klein ist im Vergleich zur betreffenden Schall-Geschwindigkeit (also bei kleinerer Mach'scher Zahl  $M = c : a$ ), so spielt bei geringen Druck- und Temperaturänderungen die Kompressibilität eine vorerst untergeordnete Rolle. Mit diesem Falle haben wir es im Grossen und Ganzen bei allen Strömungsproblemen der Aerodynamik und Flugtechnik zu tun. In dieser modernen Disziplin wird demnach auch die Luft weitgehend als unzusammen-drückbar behandelt, und zahllose Versuchsarbeiten auf diesem Gebiet haben die Berechtigung dieser theoretisch begründeten Anschauung bestätigt. Luft und Wasser sind daher vom Standpunkte der modernen Strömungslehre betrachtet in vielen Beziehungen sehr ähnliche Flüssigkeiten. Beide verhalten sich auch im Ruhezustand weitgehend ähnlich, indem jeder Widerstand gegen Formänderung fehlt.

Von dieser Erkenntnis der Verwandtschaft von Gasen und Flüssigkeiten hat man in der angewandten Hydraulik und im hydraulischen Maschinenbau bisher eigentlich wenig Gebrauch gemacht. Erst vor einigen Jahren wurde begonnen — angeregt vor allem durch die aerodynamischen Anschauungen — Luft als Versuchsmittel anstelle von Wasser für Einzelversuche wie Druckverlustmessungen an einzelnen Teilen von Maschinen, Rohrleitungen, Saugrohren von Wasserturbinen, Drosselklappen usw. anzuwenden.<sup>1)</sup> Für die Untersuchung ganzer hydraulischer Maschinen oder von Modellen solcher unter Betriebsbedingungen mit Arbeitsaustausch zwischen Strömungsmittel und Lauftrad ist aber bisher in den vielen hydraulischen Laboratorien von Lehranstalten und Fabriken, die der Erforschung der Gesetze der Wasserbewegung dienen, durchwegs Wasser verwendet worden. Im Folgenden wird eine neuartige Versuchsanlage der Firma Escher Wyss beschrieben, die gestattet, alle quantitativen und qualitativen Messungen, die mit den bekannten Wasserversuchsanlagen durchgeführt werden konnten, auf in vielen Beziehungen vorteilhaftere Weise mittels Luftbetrieb durchzuführen.

Da offenbar gerade dem hydraulischen Fachmann das Rechnen mit kompressiblen Medien und damit die Uebertragungsmöglichkeiten von Wasser- auf Luftströmungen noch wenig bekannt sind, sollen vorerst die wichtigsten theoretischen Zusammenhänge bei Gas- und Wasserbewegungen besprochen werden.<sup>2)</sup> Unser Ziel ist also, ein Modell einer kompletten Wasserturbinenanlage, beispielsweise einer modernen Kaplan-turbinenanlage, mit Luft zu betreiben. Dabei sollen die Verhältnisse derart gewählt

werden, dass genaue zahlenmässige Untersuchungen der Modell-turbinen, wie Wirkungsgradbestimmungen, Messung der Durchflussmengen und Charakteristiken usw., wie bei einer hydraulischen Versuchsanlage möglich sind. Man muss sich vorerst offenbar darüber im Klaren sein, wie gross die zulässigen Strömungsgeschwindigkeiten bei Luftbetrieb mit Rücksicht auf die Kompressibilität noch sein dürfen und ob in einem brauchbaren Arbeitsbereich bei gut messbaren Druckdifferenzen und Geschwindigkeiten eine zuverlässige Darstellung der Turbinen- oder Pumpenströmungen noch zu erwarten ist.

In den allgemeinen Gleichungen der Gasdynamik<sup>3)</sup>, die den Strömungen durch die vorgesehene Luftmaschine zu Grunde liegen, treten die Dichte  $\rho = \gamma/g$  des Gases und deren Aenderungen bestimmend auf. Im Gegensatz zu Wasser ist hier  $\rho$  nicht mehr konstant. Ein direktes Mass für die Kompressibilität ist das Verhältnis  $\frac{\Delta \rho}{\rho}$ , der Aenderung der Dichte  $\rho$  eines Gases bei einer Druckänderung  $\Delta p$ . Bei verhältnismässig kleinen Druckänderungen, die wir im vorliegenden Falle voraussetzen dürfen, setzen wir den Reziprokwert dieses Verhältnisses gleich  $\frac{d\rho}{d\rho}$ . Der Aus-

druck für die Schallgeschwindigkeit ist  $a = \sqrt{\frac{d\rho}{d\rho}}$ , so dass unser kennzeichnendes Mass für Kompressibilität in erster Näherung einfach wird  $\frac{\Delta \rho}{\Delta p} = \frac{1}{a^2}$  . . . . . (1)

Wir können die Druckänderung  $\Delta p$  als entsprechenden Staudruck  $\rho/2 \cdot c^2$  einer Geschwindigkeit  $c$  ausdrücken. Es folgt durch einsetzen in (1)

$$\frac{\Delta \rho}{\rho} = \frac{1}{2} \frac{c^2}{a^2} = \frac{M^2}{2} \quad (2)$$

( $M =$  Mach'sche Zahl = Verhältnis von Strömungs- zu Schallgeschwindigkeit).

Bei bereits respektablem Luftgeschwindigkeit von  $c = 100$  m/sec ( $M = 0,29$ ) ist also die Dichteänderung gegenüber der ruhenden Luft erst 4,2%. Die angenäherte prozentuale Dichteänderung bei verschiedenen Geschwindigkeiten zeigt

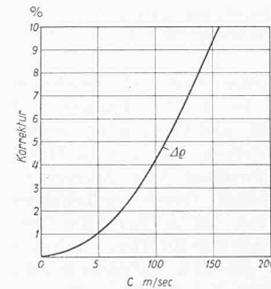


Abb. 1. Einfluss der Strömungsgeschwindigkeit von Luft auf deren Dichte  $\rho$  (20°C, 1 ata)

Abb. 1. Die Kontinuitätsgleichung für allgemeine stationäre, räumliche Gasströmungen

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (3)$$

lautet ausgeschrieben:

$$\rho \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) + u \frac{\partial \rho}{\partial x} + v \frac{\partial \rho}{\partial y} + w \frac{\partial \rho}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

( $x, y, z =$  räumliche Ordinaten,  $u, v, w =$  Geschw. Komponenten in  $x, y, z$ -Richtung). Sie geht bei  $\rho =$  konstant in die Kontinuitätsgleichung für Flüssigkeiten über:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (5)$$

Für die ebene eindimensionale Bewegung ( $v = 0, w = 0$ ) folgt damit die Kontinuitätsgleichung für den veränderlichen Querschnitt  $f$  in der dem Hydrauliker gewohnten Form

$$\rho f \cdot u = \text{const} \quad \text{oder} \quad f u = \text{const} \quad \text{bei } \rho = \text{const} \quad (6)$$

Auch in den allgemeinen Eulerschen Bewegungsgleichungen für stationäre Strömungen mit  $g_x, g_y, g_z$  als Massenkräfte

$$\begin{aligned} u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} &= g_x - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} \\ u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} &= g_y - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} \\ u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} &= g_z - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} \end{aligned} \quad (7)$$

<sup>3)</sup> «Handbuch der Physik», Bd. VII, S. 289; Ackeret, Gasdynamik.

<sup>1)</sup> Vergl. z. B. solche grundlegenden Versuche von: J. Ackeret, Theoretische Betrachtungen zur Kaplan-turbine. Escher Wyss-Mitteilg. Jahrg. IV, 1931, S. 81. Ferner C. Keller, Luft-Modellversuche an Drosselklappen für Druckleitungen von hydraulischen Anlagen. Schweiz. Bauzeitung. Bd. 107, S. 133\* (28. März 1936).

<sup>2)</sup> Eine analoge Untersuchung für Dampfströmungen wurde in der Arbeit von Ackeret, Keller, Salzmann: «Die Verwendung von Luft als Untersuchungsmittel für Probleme des Dampfturbinenbaues» früher in dieser Zeitschrift behandelt (1934, Bd. 104, S. 259\*, 275\*, 292\*).