

Zeitschrift: Schweizerische Bauzeitung
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 121/122 (1943)
Heft: 14: 60 Jahre: 1883-1943

Artikel: Aus der Versuchanstalt für Wasserbau der E.T.H.
Autor: Meyer, Peter
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-53073>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. 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. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

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. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

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. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 14.01.2026

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

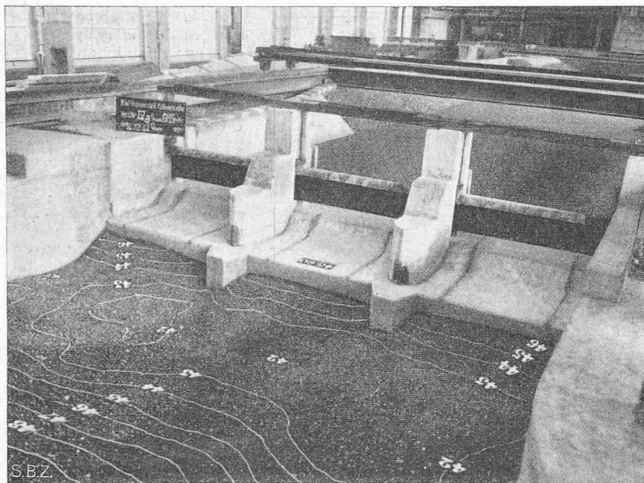


Abb. 1. Symmetr. HW-Abfluss (985 m³/s)

Modellversuche Staumauer Rapperswil

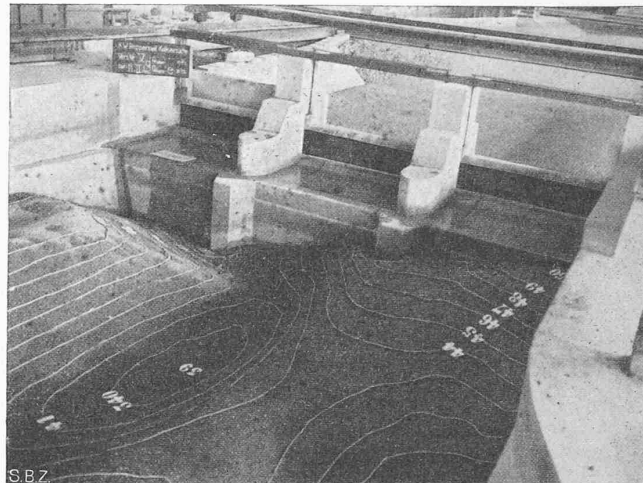


Abb. 2. Unsymmetr. Abfluss (HW-Spitze 1300 m³/s)

mässig keine zuverlässigen, vielfach sogar widersprechende Ergebnisse.

Die Vorteile der aerodynamischen Versuchsmethode bestehen für die Untersuchung kalorischer und hydraulischer Maschinen. In der Dampftechnik sind damit die Schwierigkeiten behoben, die das Experimentieren mit Heissdampf und unter Druck mit sich brachte, wie hohe Temperaturen, kleine Abmessungen der zu prüfenden Objekte, Kondensationsstörungen, hohe Umfangsgeschwindigkeiten, Unmöglichkeit der direkten Beobachtung. Im hydraulischen Maschinenbau kann man im Luftbetrieb leicht mit verkleinerten handlichen Nachbildungen der wirklichen Objekte, Turbinen, Rohrleitungen, Absperrorganen arbeiten. Die Modell- und Versuchskosten sind naturgemäss kleiner, denn viele Teile können in Holz hergestellt werden. Beim Wasserversuch liegt das zu untersuchende Stück unter Wasser; im Luftversuch ist es der Beobachtung weit besser zugänglich. Es lassen sich an den interessierenden Stellen auch Druckverteilungen unter Betriebsbedingungen viel leichter und genauer ermitteln, die die exakten Berechnungsgrundlagen für die wirklich auftretenden Kräfte in der Wirklichkeit liefern.

Die Bilder dieses Aufsatzes geben einige wenige typische Beispiele solcher moderner Modellversuche der letzten Zeit aus verschiedenen Gebieten des Maschinenbaues und zeigen, wie durchgehend fruchtbar der Grundsatz der gemeinschaftlichen Behandlung auf den Grundlagen der Ähnlichkeitsgesetze, wie sie die Aerodynamik für die Praxis aufgedeckt hat, ist. Die heutige Versuchstechnik befasst sich vorwiegend mit der grossen Mannigfaltigkeit der Einzelheiten, wie Reibungsvorgänge in den dünnen Wandgrenzschichten, Mechanismus der Wärmeübertragung, der ebenfalls wesentlich in diesen Schichten sich abspielt, mit Ablösungen, Wirbelbildungen u. s. w., also mit Feinheiten, die früher die Mittelwerttheorie wenig oder gar nicht beachtete. Seit der Klärung der Vorgänge in diesen dünnen, unmittelbar an die strombestrichenen Flächen anstossenden sog. Grenz-

schichten, die in der allgemeinen Strömungslehre als für den Sitz der Verluste ausschlaggebend erkannt wurden, musste auch in den Anschauungen des Maschinenbauers eine Wandlung eintreten. Solche Erscheinungen treten nun vielfach in gleicher Weise bei allen Kreiselmaschinen und ihren zugehörigen Apparaten, in Kühlern, Wärmeaustauschern, Wärmeübertragungsflächen u. s. w. auf. Sie lassen sich aber nicht mehr durch Berechnung am Konstruktionstisch, sondern nur durch Modellversuche mit neuen Untersuchungsmethoden und Messverfahren klären. Entwicklungsarbeiten und Studien haben sich daher in letzter Zeit stark vom Konstruktions- und Berechnungsbureau in die Laboratorien verschoben, wo das wissenschaftliche Experiment heute die Lösung theoretisch nicht mehr restlos zu erfassender komplizierter Vorgänge und Probleme liefert. Die Erkenntnis von der grossen Bedeutung der technisch-wissenschaftlichen Forschung an der Hochschule und in den einzelnen Werken unserer Industrie ist ja im letzten Jahrzehnt allgemein geworden. Sie findet ihren Ausdruck im derzeitigen Ausbau verschiedener staatlicher und privater Laboratorien, von deren Arbeiten man eine Festigung des technischen Rufes der Schweizer Industrie, die Entwicklung neuer Erzeugnisse und damit das beste Mittel zur Erhaltung ihrer internationalen Konkurrenzfähigkeit erwartet.

Aus der Versuchsanstalt für Wasserbau der E.T.H.

Ueber einige Probleme des Kraftwerkbaues

Von Prof. Dr. E. MEYER-PETER, E. T. H., Zürich

I. Kolkerscheinungen bei Staumauern von Niederdruckwerken

Versuche, die den Zweck verfolgen, die auf der Unterwasserseite von Staumauern zu erwartenden Sohlenvertiefungen und damit die erforderlichen Fundationstiefen zu ermitteln, stossen — so einfach sie grundsätzlich auch erscheinen mögen — auf eine Reihe von Schwierigkeiten, die in der naturgemässen

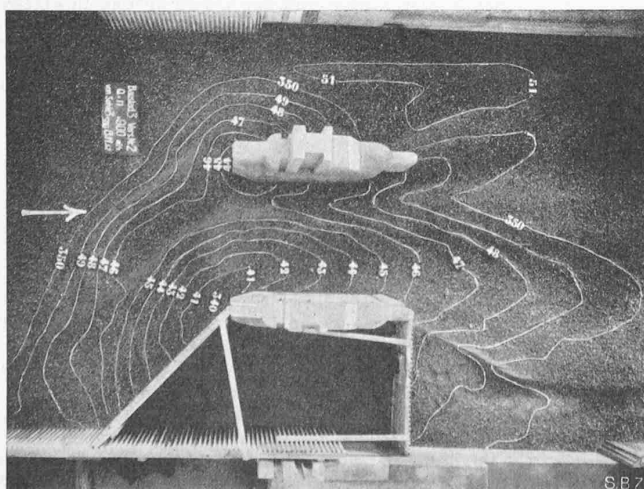


Abb. 3. Baustadium 3 (900 m³/s)

Modellversuche zum Wehrbau Rapperswil

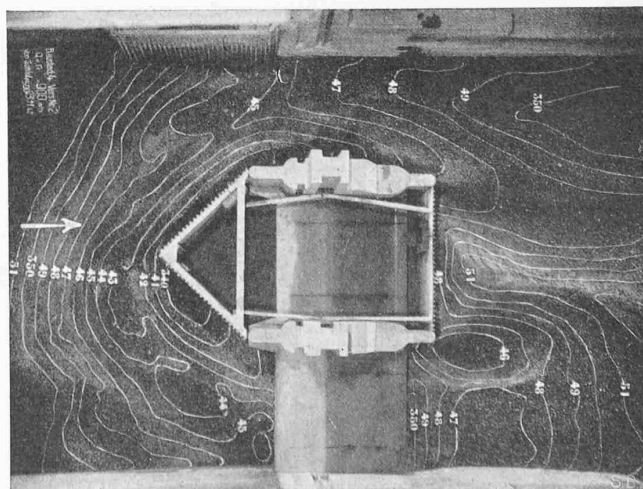


Abb. 4. Baustadium 4 (900 m³/s)

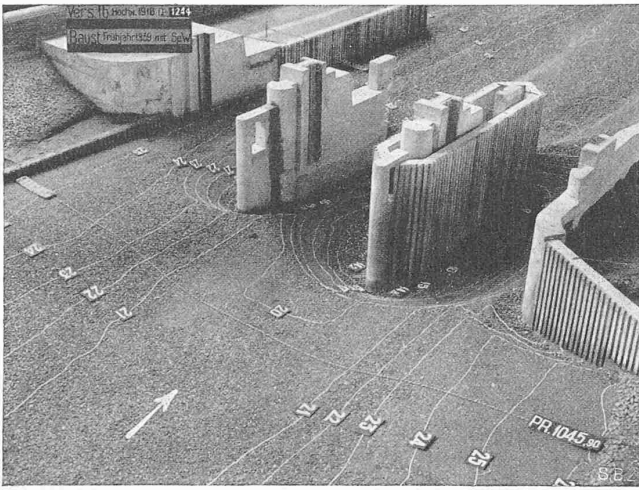


Abb. 5. Ohne Sohlenabdeckung



Abb. 6. Mit teilweiser Sohlenabdeckung

Nachbildung des Widerstandes der Flusssohle gegen die Erosionstätigkeit des Wassers, sowie in der Beschaffung der betriebstechnischen Grundlagen beruhen.¹⁾ Vor allem ist auch zu unterscheiden zwischen der Kolkwirkung beim fertig erstellten, unter normalen Betriebsbedingungen arbeitenden Bauwerk und den kurzfristigen, aber trotzdem unter Umständen viel ungünstigeren Wirkungen abnormaler Belastungen, wie sie unter Voraussetzung einer geschlossenen Wehrröffnung (Revision mit Hochwasserdurchfluss zusammen treffend) auftreten können. Zu dieser zweiten Gruppe von Sonderuntersuchungen gehört auch das Studium der im Lauf der Bauausführung, bei der das Flussprofil durch künstliche Einbauten stark verengt wird, entstehenden Kolkungen, weil sich darnach die Baumassnahmen und das Bauprogramm zu richten haben. Beim fertigen Bauwerk unter normalen Betriebsbedingungen handelt es sich um den Kolk als Endzustand. Die hierüber in der Literatur noch herrschenden Meinungsverschiedenheiten haben die Versuchsanstalt zu systematischen Versuchserien veranlasst, deren Resultate demnächst in zwei besonderen Aufsätzen bekannt gegeben werden sollen. Es handelt sich um eine Dauerwirkung, bei der der Abrieb des Sohlenmaterials und die sich hieraus ergebende Abminderung des Sohlenwiderstandes eine Hauptrolle spielt. Die kurzfristigen Beanspruchungen können ohne Berücksichtigung dieses Faktors vor allem dann einwandfrei untersucht werden, wenn die Wehrbaustelle tiefgründige Kiesschichten, mit aus Sondierungen bekannter Kornzusammensetzung aufweist, auf die nachgewiesenermassen Versuche auf Grund des Froude'schen Ähnlichkeitsgesetzes zufriedenstellende Resultate ergeben. Das will also heissen, dass die in der Natur vorhandene Geschiebemischung geometrisch ähnlich im Masstab des Modells nachzubilden ist.

¹⁾ Die Eidg. Techn. Hochschule dem S. I. A. zur Jahrhundertfeier 1937: «Der wasserbauliche Modellversuch im Dienste der Wasserkraftnutzung und der Flusskorrektur» (Prof. Dr. E. Meyer-Peter und Privatdozent Ing. Dr. H. Favre). — Beschreibung der Versuchsanstalt Bd. 95, S. 205*.

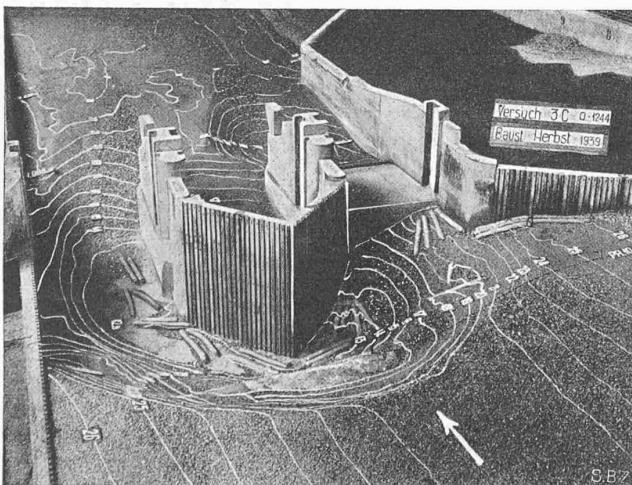


Abb. 7. Wehrbau-Versuch Reckingen (schwache Abdeckung)

Unsymmetrische Belastungen. Die Abb. 1 und 2, die sich auf das Stauwehr des Kraftwerks Ruppertswil-Auenstein beziehen, zeigen den wesentlichen Unterschied zwischen der langfristigen Einwirkung des Höchsthochwassers (Dauerversuch mit 1300 m³/s, von denen 315 m³/s durch die Turbinen geschluckt werden, während 985 m³/s bei gleichmässiger Regulierung durch das Wehr abfließen, Abb. 1), und derjenigen einer viertägigen Hochwasserspitze (Jahr 1910, $Q_{\max} = 1300$ m³/s während nur etwa 5 Std.), bei geschlossener rechtsseitiger Wehrröffnung (Abb. 2). Das Ergebnis des letzten Versuchs hat die Bauleitung dazu veranlasst, in Abweichung vom Auflageprojekt das gesamte Stauwehr um 8 bis 10 m tiefer in den anstehenden Fels zu fundieren. Man ersieht hieraus, dass sehr oft solche unsymmetrische Belastungen für die Bemessung massgebend werden.

Baustadien. Vom Standpunkt des Bauprogramms gesehen und — bei grossen Fundationstiefen — auch mit Rücksicht auf die Baukosten ist eine mögliche Verminderung der Anzahl der Wehrröffnungen, bei getroffener Wahl der gesamten Wehrebite, meistens vorteilhaft. Abgesehen von der sich daraus ergebenden stärkeren Kolkwirkung im Fall einer bei Hochwasser geschlossenen Oeffnung, wie sie aus Abb. 2 hervorgeht, ist aber auch zu beachten, dass der Bauvorgang eine relativ zur gesamten Durchflussbreite entsprechend stärkere Einschnürung durch Absperrbauten erfordert. Abb. 3 zeigt die Kolkbildung während des Baustadiums 3 des Wehrbaus Ruppertswil (fertiggestellte Widerlager und Wehrpfeiler und Stromablenker für die rechtsufrige Wehrrschwelle). Abb. 4 bezieht sich auf das folgende Stadium 4 mit fertiger rechtsufriger Wehrrschwelle und Stromablenker für die Mittelschwelle. Zweck der Versuche war im vorliegenden Fall die Ermittlung der mindestens erforderlichen Rammstiefen der Stahlpundwände der Stromablenker. Man erkennt die rund 10 m betragenden Kolkstiefen an der angeströmten Spitze des Stromablenkers im Stadium 4, bzw. an der stromaufwärtigen Spundwand im Stadium 3. In Bezug auf die Wahrscheinlichkeit des tatsächlichen Eintretens so starker Auskolkungen ist natürlich darauf hinzuweisen, dass die in den verschiedenen Etappen zu erwartenden Hochwassermengen nicht bekannt sind. Damit wird es notwendig, an Hand der vorhandenen hydrographischen Unterlagen, die in der zu untersuchenden Etappe zu erwartenden ungünstigsten Wasserstände zu wählen. Beide Aufnahmen stellen das Ergebnis einer Durchflussmenge von 900 m³/s nach vorangegangenen Abfluss von 500 m³/s dar, Wassermengen, die an der Aare in jedem Monat des Jahres auftreten können. Auch wenn diese häufig auftretenden Spitzen kurzfristig sind, zeigen Versuche mit Sohlenaufnahmen in Funktion der Zeit, dass 90% des maximalen Kolks schon in etwa fünf Tagen erreicht werden.

Noch stärkere Einengung als im Fall Ruppertswil erforderte der Bau des Stauwehrs des Kraftwerkes Reckingen. Die Abb. 5 und 6 beziehen sich auf ein Baustadium, das neben der Einschnürung durch das linke Widerlager und die rechtsufrige Maschinenhausbaugrube einen fertigen und einen im Bau begriffenen Wehrpfeiler umfasst. Abb. 6 zeigt einen Versuch, die aus Abb. 5 ersichtlichen grossen Kolkstiefen mit Hilfe einer Abdeckung der Flusssohle durch Senkwalzen zu vermindern. Im vorliegenden Falle entschloss sich die Unternehmung, unter Verzicht auf eine derartige Abdeckung, die Stahlpundwände im Fels zu verankern. Dass die Auskolkung bis zu dieser rd. 13 m

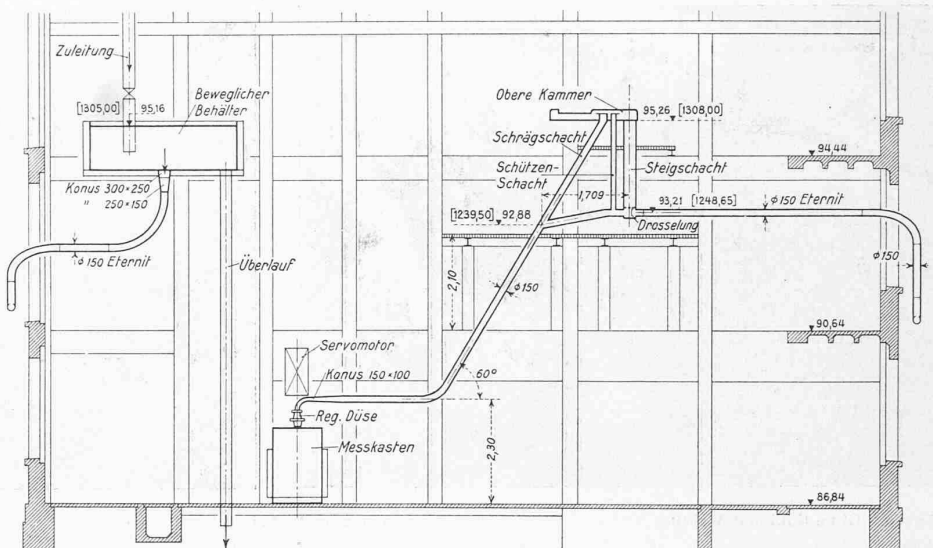
betragenden Tiefe für den Fall des Eintretens eines Hochwassers, wie dasjenige von 1918 mit $Q_{\max} = 1244 \text{ m}^3/\text{s}$, erwartet werden musste, zeigt auch die folgende Abb. 7, aus der beiläufig hervorgeht, dass eine bloss schwache Abdeckung mit Senkwalzen keine wesentliche Verminderung des Kolkess mit sich bringt.

II. Wasserschloss- und andere Schwingungsprobleme

Der Bau des Kraftwerks Innertkirchen²⁾, dessen Gesamtanordnung schematisch aus Abb. 8 hervorgeht, gab Anlass zu einer Reihe von Spezialuntersuchungen aus dem Gebiete nichtstationärer Strömungsvorgänge, die teils experimentell, teils rechnerisch durchgeführt wurden.

Wasserschloss. Wie aus den Abb. 8 und 9 ersichtlich, handelt es sich um ein Doppelwasserschloss mit zwei Steigschächten und einer gemeinsamen oberen Wasserkammer (der im ersten Projekt als Schützenschacht bezeichnete dritte Schacht wurde in der Ausführung weggelassen). Der vertikale Hauptschacht ist beim Einlauf des Druckstollens gedrosselt, in die obere Wasserkammer ist der Hauptschacht mit einem Ueberfall eingeführt; der Druckstollen erhält Zuschusswasser aus drei Zwischenfassungen, die ebenfalls als Steigschächte wirken. Die Berechnung der Massenschwingungen ist bei dieser Gesamtanordnung grundsätzlich zwar möglich, aber sehr zeitraubend, sobald zwecks optimaler Abmessungen die Einzelheiten variiert werden sollen (Durchmesser der Steigschächte, Drosselungsgrad, Ueberfallhöhen, Drosselung der Zwischenfassungen, Rauigkeit der Stollenwände usw.), weshalb sich Modellversuche als zweckmässig erwiesen. Ueber die Frage der Modellähnlichkeit gab eine Dimensionsbetrachtung Aufschluss, deren Ergebnis kurz wie folgt zusammengefasst werden kann: Wählt man passende Verhältniszahlen (Natur zu

²⁾ Eingehend beschrieben in SBZ Bd. 120, S. 25* (auch als Sonderdruck erschienen).



Modellmassstäbe:

gewählt: $\left\{ \begin{array}{ll} \text{Stolldurchmesser} & 1:22, \\ \text{Rauigkeitswert (Stollen)} & 1:0,8962, \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{ll} \text{Stollenlänge} & 1:63,665 \\ \text{Geschwindigkeit im Stollen} & 1:4,735 \end{array} \right.$

berechnet: Wasserschlosshöhe und Breite 1:28,83, Zeit 1:10,46

Die in [] gesetzten Höhenkoten beziehen sich auf die Projektkoten

SBZ

Abb. 9. Schnitt 1:150 der Versuchsanstalt mit dem eingebauten Wasserschloss-Modell

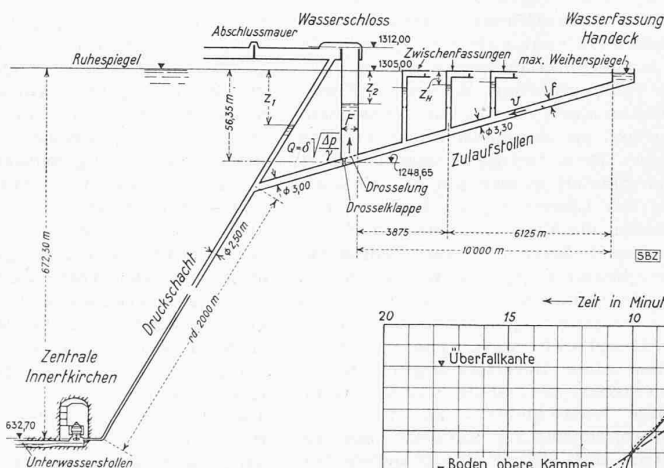


Abb. 8. Schema der Wasserzuleitung

Modellversuche für das Wasserschloss des Kraftwerkes Innertkirchen der K.-O. der Versuchsanstalt für Wasserbau an der E. T. H. Zürich

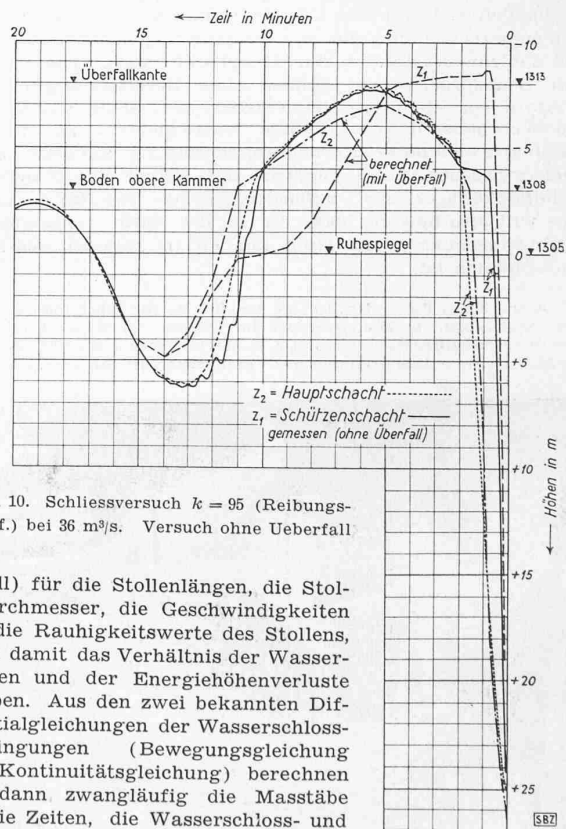


Abb. 10. Schliessversuch $k = 95$ (Reibungskoeff.) bei $36 \text{ m}^3/\text{s}$. Versuch ohne Ueberfall

Modell) für die Stollenlängen, die Stollendurchmesser, die Geschwindigkeiten und die Rauigkeitswerte des Stollens, so ist damit das Verhältnis des Wassermengen und der Energiehöhenverluste gegeben. Aus den zwei bekannten Differentialgleichungen der Wasserschloss-Schwingungen (Bewegungsgleichung und Kontinuitätsgleichung) berechnen sich dann zwangsläufig die Massstäbe für die Zeiten, die Wasserschloss- und Schwingungshöhen und die horizontalen Wasserschlossquerschnitte. Es ist also nicht erforderlich, die Stollenlänge und den Stollendurchmesser in gleichem Massstab nachzubilden, welche Erkenntnis eigentlich erst die

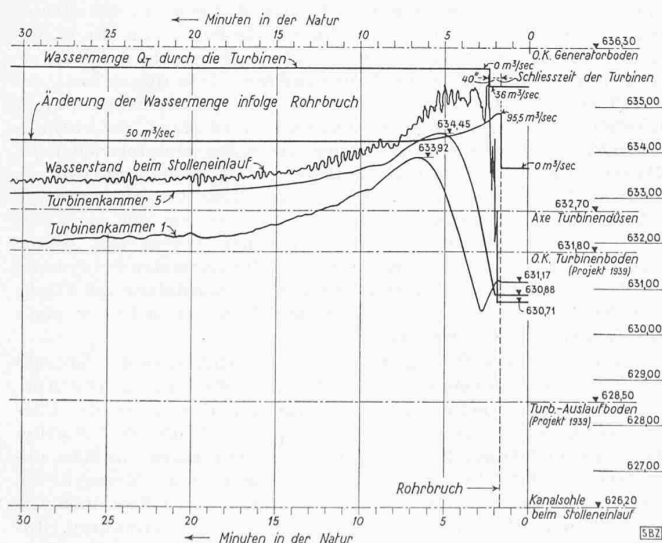


Abb. 14. Rohrbruch-Versuch (Maschinenhaus). Gemessene Wasserstände beim Stolleneinlauf und in den Turbinenkammern

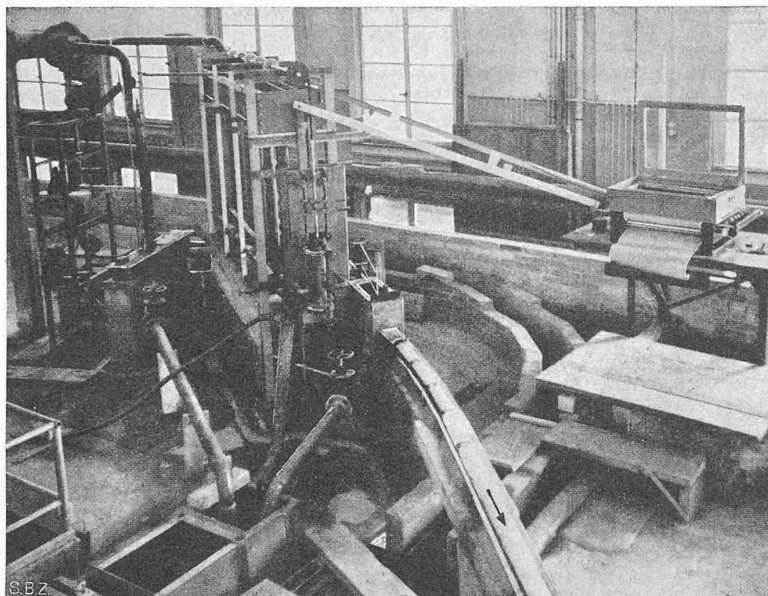
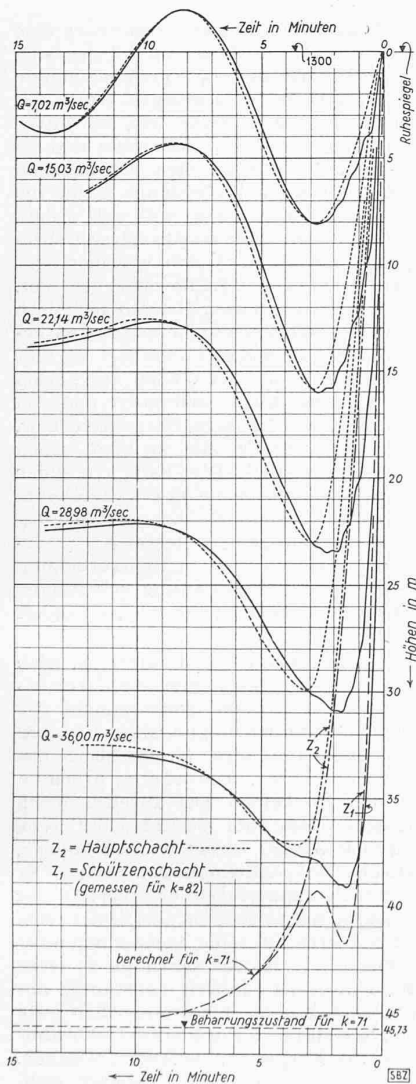


Abb. 13. Modell zur Prüfung der Spiegelschwankungen im Masch'haus bei Rohrbruch

praktische Durchführung von Modellversuchen gestattet. Einige charakteristische Schwingungen, die im Modell mittels Chronographen aufgezeichnet wurden, sind in den Abb. 10 u. 11 dargestellt.

Abb. 11. Öffnungs-Versuche für $k=82$ und $Q=7$ bis $36 \text{ m}^3/\text{s}$

Drosselklappe. Besondere Aufmerksamkeit wurde der Wirkungsweise der am Ausgang aus dem Hauptschacht des Wasserschlosses angeordneten Drosselklappe geschenkt, deren Aufgabe darin besteht, im Falle eines Rohrbruchs in der Zentrale bzw. in der Schieberkammer der Verteilung, als Ab-

rischen Ermittlung durch die Versuchsanstalt für Wasserbau ist in Abb. 12 wiedergegeben.

Das sich hieraus ergebende, durch den Konstrukteur der Klappe einzuhaltende mechanische Schliessgesetz ist nicht linear, sondern setzt sich aus drei Graden zusammen. Bis zu einem Drehwinkel von etwa 50° darf die Klappe rasch geschlossen werden; hierauf ist ihre Winkelgeschwindigkeit zu zwei Malen stark herabzusetzen, bis der Schliessvorgang mit einem Drehwinkel von 78° erst nach $18\frac{1}{2}$ Minuten beendet ist. Die im Diagramm eingezeichneten Kurven y_i stellen bei den beiden Belastungsfällen die Variation des Wasserspiegels im Hauptschacht, die Kurven h_i die im Stollen vor der Klappe auftretenden Druckhöhen dar. Der Druck stromabwärts der Klappe wurde auf Grund der erwähnten Modellversuche der EWAG eingesetzt.

Schwingungen in den Unterwasser-Turbinenkammern im Falle eines Rohrbruchs. Trotz der soeben besprochenen Sicherheitsvorrichtung beim Wasserschloss und den doppelten Absperrschiebern in den Strängen der Verteilung war es gegeben,

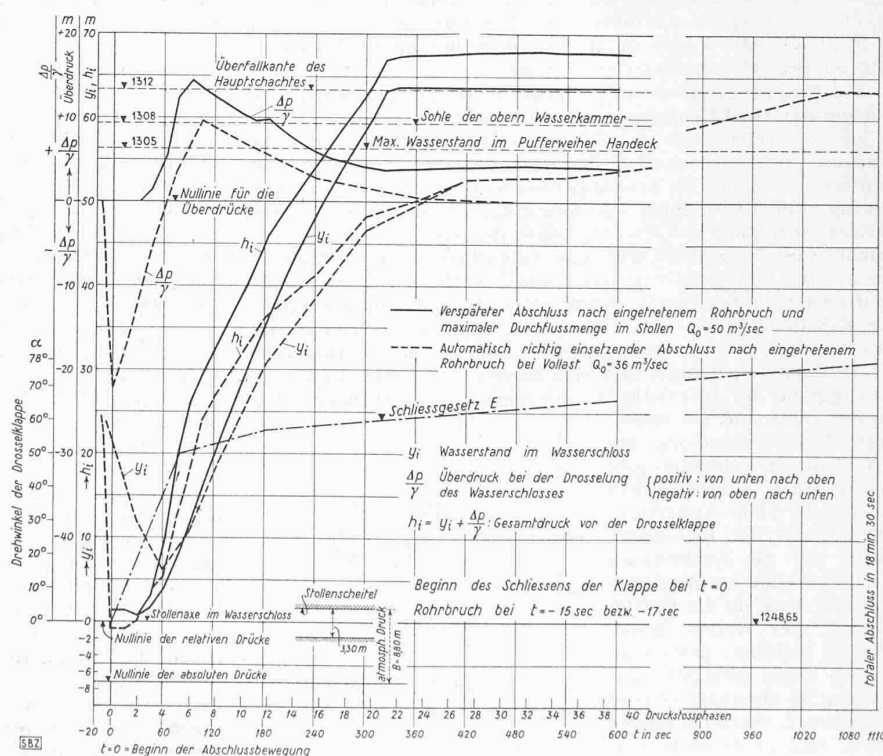


Abb. 12. Untersuchung der hydraulischen Vorgänge beim Schliessen der Drosselklappe (Wasserspiegel- und Druckschwankungen)

zu untersuchen, wie sich der Ablaufstollen verhalten würde, falls bei einem Rohr- oder Schieberbruch Wasser unter dem hohen Druck von 650 m in die Turbinenkammern eindringe. Bei einer Kavernenzentrale ist die sichere Ableitungsmöglichkeit einer solchen Katastrophenwassermenge von ganz besonderer Bedeutung, könnte sie doch, im Falle eines Rohrbruchs, kurzfristig gegen 100 m³/s betragen, während der Unterwasserstollen, der das Abwasser nach der Gadmeraare führt, normalerweise für 36 m³/s bemessen ist. In einem Modell wurden die fünf Turbinenkammern der Zentrale Innertkirchen samt Ablaufstollen dargestellt und durch eine Einrichtung ergänzt, die gestattete, neben dem Normalbetrieb eine Rohrbruchwassermenge einzuführen. Abb. 13 zeigt die Modellanordnung, im Vordergrund den Ablaufstollen, in der Mitte und links hinten die Turbinenkammern

mit den Reguliervorrichtungen für Normalbetrieb und Rohrbruch, rechts hinten den Chronographen zur Aufzeichnung der in den Turbinenkammern und dem darüberliegenden Turbinenraum bei Rohrbruch entstehenden Wasserspiegelschwankungen. Der Vorgang ist durch die Chronographenaufzeichnung der Abb. 14 veranschaulicht, wobei eine plötzlich einfallende Wassermenge von 95,5 m³/s, während Vollbelastung der Turbinen, die durch Entleerung des Wasserschlosses allmählich auf die maximal mögliche Stollenwassermenge von 50 m³/s abfällt, vorausgesetzt ist. Man sieht, dass die Bedingung, der Generatorboden dürfe nicht überflutet werden, in einem solchen Falle eingehalten werden kann, dagegen wird der normalerweise als Freilaufstollen funktionierende Ablaufkanal vorübergehend unter Druck gesetzt.

(Schluss folgt)

Die Fortschritte der Hochfrequenztechnik in den letzten zehn Jahren

Von Prof. Dr. F. TANK, E. T. H., Zürich

Die Hochfrequenztechnik ist die Technik der schnellen Wechselströme. Mit der Starkstrom- und Schwachstromtechnik im engeren Sinne, aber auch mit der Akustik und insbesondere mit der Technik der Elektronenröhren ist sie eng und vielfach verflochten. Präzision, Zuverlässigkeit der Grundlagen, im allgemeinen geringer Materialaufwand bei hohen Ansprüchen an die geistige Leistung zeichnen sie aus. Vor etwa einem Dezenium suchte die «Schweiz. Bauzeitung» durch eine Sondernummer¹⁾ das Interesse ihres Leserkreises für die junge Hochfrequenztechnik zu gewinnen. Sie heute von den seither erfolgten Fortschritten Rechenschaft abzugeben, dürfte sicher lehrreich sein. Wir sind uns dabei der Schwierigkeit bewusst, einer nach Breite und Tiefe weit ausholenden Entwicklung im Rahmen einer knappen Uebersicht gerecht zu werden.

I.

Das Hauptanwendungsgebiet der Hochfrequenztechnik ist die *Nachrichtentechnik ohne Draht*. Schifffahrt, Flugwesen, Rundspruch, kommerzielle Telegraphie und Telephonie, die Armee, der Wetterdienst, die Anwendungen der drahtlosen Fernregistrierungen und Fernsteuerungen, Fernsehen und Bildübertragung: sie alle erheben in steigendem Umfang Ansprüche auf die Wellen des Aethers für ihre Zwecke. Die grundlegenden und schwierigen Fragen der Wellenzuteilung sind zum letzten Mal auf breiter Basis an der Wellenkonferenz von Kairo 1938 behandelt worden. Das ganze Wellenband von 10 000 bis 1 m Wellenlänge, entsprechend Schwingungen von 30 000 bis 300 Mio Hz (Per/sec) ist damals für die verschiedenen Dienste vollständig aufgeteilt worden. Eine Vermehrung des Verkehrs ist nur noch durch beste Ausnutzung dieses gegebenen Wellenbandes auf der Grundlage eingehender Studien der Ausbreitungseigenschaften der Wellen möglich und durch Erschliessung neuer Wellengebiete im Bereich allerhöchster Frequenzen.

Die Fragen der *Wellenausbreitung* bleiben das grundlegende Problem der Hochfrequenztechnik. Es ist bekannt, dass lange und kurze Wellen sich sehr verschieden verhalten, und dass nicht nur die Eigenschaften des Erdbodens, sondern auch die Einflüsse der höchsten Atmosphärenschichten von grösster Bedeutung sind. Es ist daher viel Arbeit darauf verwendet worden, die Zusammenhänge der Erscheinungen der oberen Atmosphärenschichten, der *Ionosphäre*, und ihrer Beeinflussung durch Sonnenbestrahlung und Sonnentätigkeit mit den Uebertragungseigenschaften der elektrischen Wellen zu erforschen. Man unterscheidet eine E-Schicht in etwa 100 km Höhe und eine F-Schicht, die etwa 200 bis 400 km hoch liegt; diese ist meist aufgeteilt in eine tiefere F₁-Schicht und eine höhere F₂-Schicht. Ueber die Abhängigkeit der Intensität der Ionisierung (Elektronendichte) von der Höhe und der besonderen Zusammensetzung der Luft in diesen Schichten gibt Abb. 1 einen schematischen Ueberblick. Die elektrische Leitfähigkeit der Ionosphäre besitzt auf die Ausbreitung der Radiowellen einen solchen Einfluss, dass sie die Strahlrichtung der Wellen kontinuierlich krümmt, unter Umständen sogar spiegelt. Die Wirkung ist abhängig von der Wellenlänge, stark bei langen Wellen und kaum mehr vor-

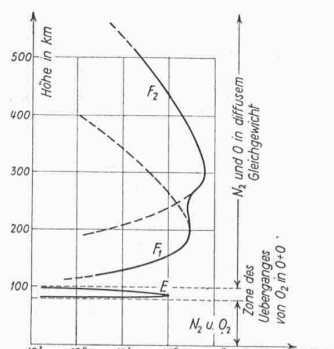


Abb. 1 Elektronendichte der Ionosphäre

handen bei ultrakurzen Wellen. Kurze Wellen von 10 bis 100 m Wellenlänge, die unter nicht zu steilem Winkel abgestrahlt werden, können sehr grosse Reichweiten erlangen, indem sie erst nach Ueberschreitung einer langen toten Zone wieder zur Erde niedersteigen.

Die Lage der Ionosphärenschichten lässt sich durch Messungen ermitteln und durch Registrierungen, die nach den Grundsätzen der Echolotung aufgebaut sind, fortlaufend verfolgen. Besondere Störungen entstehen bei Eruptionen von Gasmassen auf der Sonne, die mit Geschwindigkeiten von etwa 1000 m/sec ausgeschleudert werden und auf die Erde gelangen, wo sie Polarlichter und magnetische Stürme erzeugen. Auch der Sonnenphysiker bringt den Ionosphärenmessungen heute grosses Interesse entgegen.

II.

Rechnet man für die Uebertragung eines Gespräches eine erforderliche Frequenzbandbreite von 10 000 Hz, so würden sich im Mittelwellengebiet zwischen 300 und 600 m Wellenlänge (500 000 bis 1 000 000 Hz) 50 Gespräche unterbringen lassen, im Kurzwellengebiet zwischen 30 und 60 m deren 500, im Ultrakurzwellenbereich zwischen 3 und 6 m 5000, und wenn man in das Gebiet der Dezimeter- und Zentimeterwellen sich begeben könnte, liesse sich zwischen 3 und 6 cm Wellenlänge Raum für 50 000 gleichzeitige Telefongespräche finden, was schon dem Bedürfnis einer mittleren Stadt entsprechen würde. Diese Ueberlegungen sind altbekannt, aber sie zeigen, welch enormer Frequenzreichtum im Gebiete der aller kürzesten Radiowellen herrscht. Vielleicht gelingt es einmal in Zukunft, diesen Bereich technisch zu erschliessen und dafür andere Wellenbereiche zugunsten bestimmter Dienste zu entlasten. Man muss sich aber darüber klar sein, dass die Reichweite dieser sehr kurzen Wellen nur gering ist, indem sie sich ähnlich wie das Licht ausbreiten und von Gegenständen merklicher Grösse, wie Häusern, Bergketten usw. abgeschattet werden. Guter Empfang ist also im allgemeinen nur innerhalb optischer Sichtweite möglich. Dies kann aber einen Vorteil bedeuten, wenn es sich um Probleme des Nahverkehrs handelt. Die sehr kurzen Wellen lassen sich scheinwerferartig bündeln und ermöglichen Uebertragungen breitester Frequenzbänder mit sehr geringem Energieverbrauch. Zur Ueberbrückung grösserer Entfernungen bedarf es der Einschaltung von Relais-Stationen. Das Interesse an sehr kurzen Radiowellen ist daher von Jahr zu Jahr gewachsen.

Die Schwierigkeiten sind aber erheblich und zahlreich. Eine Schwierigkeit darf heute als überwunden gelten, die darin bestand, dass mit kürzeren Wellenlängen die Abmessungen der aus Spule und Kondensator gebildeten Schwingungskreise immer kleiner und kleiner wurden und damit diese Kreise überhaupt nicht mehr einwandfrei definiert waren. Die Lösung brachten der *Hohlraumresonator* und der *Hohlleiter*. Der allseitig durch leitende Wände abgeschlossene Hohlraum besitzt elektrische Eigenschwingungen, die durch Resonanz erregt werden können, gerade so gut als er akustische Eigenschwingungen besitzt. Er kann daher den elektrischen Schwingungskreis ersetzen. In der Technik der höchsten Frequenzen hat er sich als ausgezeichnetes Bauelement bewährt. Nicht nur erhalten seine Abmessungen für die Konstruktion günstige Werte und ist das schwingende elektrische und magnetische Feld in seinem Innern vollständig abgeschirmt, sondern er besitzt auch eine ausserordentlich gute Resonanzschärfe. Eine besonders einfache Form eines Hohlraumresonators ist der kubusähnliche Körper mit leitenden Wänden. Besitzen seine Kanten die Längen a , b , c , so berechnet sich, nicht unähnlich wie in der Akustik, ein System von möglichen Eigenwellenlängen zu

¹⁾ SBZ Bd. 104, Nr. 14, S. 149* ff. (1934).