Zeitschrift: Schweizerische Bauzeitung
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 79/80 (1922)
Heft: 6

Artikel: Ueber den heutigen Stand des wasserbaulichen Versuchswesens
Autor: Meyer-Peter, E.
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-38045

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: 02.07.2025

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

INHALT: Ueber den heutigen Stand des wasserbaulichen Versuchswesens. — Abwärme-Verwertung. — Wettbewerb zum Wiederaufbau von Sent. — Miscellanea: Eidgenössische Technische Hochschule. Ausbau der Wasserkräfte in der Steiermark. Schweizerische Bundesbahnen. Ueber die zunehmende Verwendung flüssiger Brennstoffe auf Schiffen. Untergrundbahn in Madrid. Die Bibliothek der Hochschule von Löwen. — Nekrologie: F. Hennings. — Korrespondenz. — Literatur: Die Drahtseilbahnen. Technische Untersuchungsmethoden zur Betriebskontrolle. Deutscher Städtebau in Böhmen. Literarische Neuigkeiten. — Vereinsnachrichten: Bernischer Ingenieur- und Architekten-Verein. Stellenvermittlung.

Band 79. Nachdruck von Text oder Abbildungen ist nur mit Zustimmung der Redaktion und nur mit genauer Quellenangabe gestattet. **Nr. 6.**

Ueber den heutigen Stand des wasserbaulichen Versuchswesens.

Von Prof. *E. Meyer-Peter*, Zürich.

Schon auf verschiedenen Gebieten der Ingenieur-Wissenschaften, insbesondere im Eisen-, Eisenbeton- und Maschinenbau, hat sich das Versuchswesen eingebürgert, während es im Wasserbau trotz zahlreicher Anläufe nur unter Schwierigkeiten Eingang finden kann. Den direkten Anlass zum wasserbaulichen Versuch gab wohl das Bestreben einiger Dozenten, die Bewegungserscheinungen, die im Wasser auftreten, den Studierenden am Modell vorzuführen. Allmählich kam dann die Anwendung des Versuchs auch für die Zwecke der Praxis und der Forschung. Die unbestreitbaren Erfolge, die hierin in den letzten Jahren von den Versuchsanstalten in Karlsruhe, Wien, Berlin, Dresden und Darmstadt erzielt wurden, berechtigen wohl einige bezügliche Mitteilungen an dieser Stelle.

Ueber den Wert des Modellversuchs im Wasserbau waren die Meinungen lange Zeit geteilt, heute ist aber die Versuchstechnik soweit entwickelt, dass die Grenzen der Uebertragbarkeit des Modellversuchs auf die Natur umschrieben werden können. Damit aber ist bereits eine Hauptbedingnng für den endgültigen Erfolg vorhanden.

Diese Hauptfrage erfuhr anlässlich einer in Karlsruhe am 27. und 28. November 1921 im Anschluss an die offizielle Einweihung des Neubaus der Bauingenieur-Abteilung der Techn. Hochschule veranstalteten Tagung der Dozenten für Wasserbau zahlreicher Techn. Hochschulen eine eingehende Würdigung. Aus der Diskussion ging klar hervor, dass der Versuch nicht an Modellen allzu kleinen Masstabes vorgenommen werden darf. Grundbedingung ist, dass auch im Modell die Bewegung turbulent bleibt, denn bei der gleitenden Bewegung ist das Reibungsgefälle proportional der ersten, die Geschwindigkeitshöhe dagegen proportional der zweiten Potenz der Geschwindigkeit; eine Veränderung des Masstabes des Bewegungvorganges ist mithin von vornherein unzulässig. Ist der Modellmasstab so gross, dass turbulente Bewegung auftritt, so sind Reibungsgefälle *und* Geschwindigkeitshöhe dem Quadrate der Geschwindigkeit proportional (das erste wenigstens annähernd), es kann also für diese Bewegung ein Aehnlichkeitsgesetz aufgestellt werden. Immerhin besteht auch hier eine Einschränkung, insofern es bis heute nicht gelungen ist, bei sehr kleinen Modellen etwa im Masstab 1 : 100 oder 1 : 50, die Rauhigkeit der Wandungen masstäblich richtig nachzubilden, namentlich dann nicht, wenn in der Natur diese Wandungen schon sehr glatt sind (Stollenwandungen u. drgl.). Es ist deshalb angezeigt, die genannten Modellmasstäbe nur dann anzuwenden, wenn es sich um die Untersuchung sehr kurzer Flusstrecken handelt, bei denen infolge bestehender Proportionalität zwischen Länge der Strecke und Reibungsgefälle, dieses gegenüber den Geschwindigkeitshöhen klein ist. Bei Versuchen auf kurzer Flusstrecke spielt auch die Zähigkeit des Wassers eine untergeordnete Rolle, wie Prof. Th. Rehbock durch Versuche an Modellen von Ueberfällen mit Zuhülfenahme von Wasser verschiedener Temperatur nachweisen konnte.

Handelt es sich neben der Untersuchung des Wasserabflusses auch noch um die Feststellung der Einwirkung des Wassers auf die Sohle und die Ufer des Flusses, so kann der Modellversuch kleinen Masstabes nur eine qualitative Anschauung der Vorgänge, etwa zu Demonstrationszwecken, geben. Es können hier aber bei Anwendung grösserer Verhältnisse, die denen der Natur nahe kommen, auch zahlenmässig richtige Ergebnisse gefunden werden.

Die wasserbaulichen Versuche können mithin in zwei Hauptkategorien eingeteilt werden, nämlich in „rein hydraulische", bei denen es sich um das Studium des Wasserabflusses an sich handelt, und in „flussbauliche", bei denen die Massenwirkung des Wassers auf die bewegliche Flusssohle zu untersuchen ist. Jene können an Modellen nicht allzu kleinen Masstabes durchgeführt werden, diese hingegen verlangen grosse Gerinne und grosse Wassermengen.

Die Versuche in einem Wasserbaulaboratorium haben bei beiden Versuchskategorien den Zweck, die zu untersuchende Erscheinung von Störungsfunktionen, wie sie in der Natur unvermeidlich sind und Anlass zu Trugschlüssen geben, zu befreien[1]). Im Gegensatz zu der Beobachtung in der Natur, deren Wert und Notwendigkeit hier selbstverständlich nicht geschmälert werden soll, stellt sich der Laboratoriumsversuch zur Aufgabe, jede Erscheinung zu analysieren, sie unabhängig von sekundären Ursachen zu gestalten, wodurch allein es möglich ist, auf sicherer Grundlage zu arbeiten. Die Beobachtung in der Natur hat mit enormen Schwierigkeiten zu rechnen, zu denen die Unregelmässigkeit von Längs- und Querprofilen des Flusslaufes, dessen Krümmungen, die Inkonstanz der Wassermenge u. a. m. zu rechnen sind.

Die Praxis verlangt heute die Lösung einer ganzen Reihe „rein hydraulischer" Probleme. Es gehören dazu die Untersuchungen über Pfeilerstau, über den Abfluss des Wassers bei Ueberfällen und Wehrbauten, festen sowohl als beweglichen, mit allen Fragen die sich daran knüpfen (Form des Abflusstrahls und günstigste Wehrform, Saugwirkung bei den Abschlussorganen usw.), ferner Versuche über die Bauwerke, deren Zweck in der Beschleunigung oder Verzögerung der Abschlussgeschwindigkeit besteht (Umlaufkanäle, Saugkrümmer usw.) und über die Entlastungsvorrichtungen bei Sammelweihern.

Als Hauptanwendungsgebiet des „flussbaulichen" Versuchs seien die Probleme des Geschiebetransportes, Kolkversuche, Widerstände in Schiffahrtskanälen und dergl. genannt. Prof. Dr. Schaffernak in Wien untersuchte im vergangenen Jahr die Gültigkeit des Schleppkraftgesetzes von Du Boys, das er, in Uebereinstimmung mit Schocklitsch, bis zu Geschiebegrössen von 5 mm bestätigt fand. Die bis zu Korngrössen von 10 cm durchgeführten Versuche Schaffernaks sollen demnächst im Druck erscheinen.

Auf dem Gebiete des „rein hydraulischen" Versuches sind vor allem die Arbeiten Prof. Dr. Rehbocks in Karlsruhe bekannt geworden. Neben den Untersuchungen über den scharfkantigen Ueberfall ohne Seitenkontraktion, die zur Aufstellung einer neuen Ueberfallformel[2]) geführt haben und sehr einlässlichen Studien über den Pfeilerstau[3]), verdanken wir Rehbock namentlich seine Darlegungen über den Wechsel des Fliesszustandes und über die Walzenbildung[4]).

[1]) *Beyerhaus:* Die Trugschlüsse aus den Mississipi-Messungen von Humphreys und Abbot und der fehlerhafte Aufbau der Ganguillet und Kutterschen Formel. «Zentralblatt der Bauverwaltung», 2. April 1921. — *Beyerhaus:* Geschwindigkeitsformeln für Wasserläufe. «Der Bauingenieur», 30. September 1921.

[2]) Handbuch der Ingenieur-Wissenschaften: Wasserbau, Stauwerke, Wehre und Fischwege, bearbeitet von *Th. Rehbock, K. E. Hilgard, P. Gehrhardt.*

[3]) *Rehbock:* «Zentralblatt der Bauverwaltung» vom 3. Mai 1919 und «Der Bauingenieur», Heft 13, 1921.

[4]) *Rehbock:* Betrachtungen über Abfluss, Stau und Walzenbildung bei fliessenden Gewässern. (Der Fliesszustand bei turbulenter Bewegung wird als «strömend» bezw. «schiessend» bezeichnet, je nachdem die mittlere Profilgeschwindigkeit kleiner oder grösser ist als die Wellen-Fortpflanzungsgeschwindigkeit, die bei gegebener Wassertiefe t durch den Ausdruck $\sqrt{g \cdot t}$ annähernd bestimmt ist, g = Beschleunigung der Schwere.)

Auf den Unterschied der beim Wasser möglichen beiden Abflussarten wird allerdings schon früher in der theoretischen Hydraulik hingewiesen[1]); ihren Einzug in die Praxis hat indessen diese Erkenntnis wohl erst seit den experimentellen Arbeiten im Karlsruher Flussbaulaboratorium gefunden. Das verschiedene Verhalten des Wassers bei Unstetigkeiten des Gerinnes, je nachdem es sich „strömend" oder „schiessend" bewegt, wurde durch Versuch festgestellt und der Allgemeinheit zugänglich gemacht. Bei einer Reihe praktisch wichtiger Fragen sehen wir infolgedessen jetzt schon bedeutend klarer, insbesondere bei den Wehrbauten, da Rehbock das Mittel zur Vernichtung der Energie des abstürzenden Wassers, die „Deckwalze", in ihrer Wirkung erkannt hat. Auf praktischem Gebiete sind demnach eine ganze Anzahl Probleme bereits einer glücklichen Lösung entgegengegangen, von der man ruhig behaupten kann, dass sie nur durch den Versuch, nicht aber durch blosse Ueberlegung und Rechnung hätte gefunden werden können.

Für die Schweiz sind in dieser Hinsicht vor allem die Rehbock'schen Untersuchungen über den *Sihlüberfall* bemerkenswert[2]). Dieses Bauwerk[3]) wurde im Zusammenhang mit dem Umbau der linksufrigen Zürichseebahn durch die S. B. B. erstellt; es dient der Unterführung der Doppelspur Zürich-Thalwil unter der zu diesem Zwecke in ein neues Bett verlegten Sihl. Unmittelbar nach dem Tunnel stürzt die Sihl um eine Höhe von rund 4,60 m auf das Niveau des alten Bettes hinunter. Das hierzu erstellte Ueberfallbauwerk bildet mit dem Tunnel ein zusammenhängendes Ganzes, dessen Formgebung, soweit der Wasserabfluss in Betracht kam, genau nach den im Karlsruher Flussbaulaboratorium am Modell gewonnenen Erfahrungen erfolgte. Dadurch dass die S. B. B. diese umfassenden Versuche veranlassten, haben sie sich auf dem Gebiete des wasserbaulichen Versuchswesens verdient gemacht.

Als Grundlage für die Versuche dienten folgende, von den S. B. B. aufgestellten und hier kurz zusammengefassten Bedingungen:

Sicherung des Bahntunnels gegen Unterspülung,

Vernichtung der lebendigen Kraft der abstürzenden Wassermengen auf kürzester Strecke durch das Wasser selbst, ohne Kolkerscheinungen,

Abfluss des Wassers im Unterwasserbett mit normaler Geschwindigkeit unter Vermeidung von periodischen Schwankungen der Wasserführung und von Geräuschen,

Sicherung einer glatten Geschiebeabfuhr.

Das im ursprünglichen Projekt vorgesehene Stufenwehr hatte sich schon bei den Vorversuchen im Maschinen-Laboratorium der E. T. H. als ungünstig erwiesen, weil bei grösserer Wasserführung der Sihl die Stufen einfach übersprungen wurden, ferner weil sich unter dem Strahl sog. Grundwalzen bildeten, die die regelmässige Geschiebeabfuhr beeinträchtigten und weil schliesslich, infolge der Schwierigkeit der Anbringung einer hinreichenden Strahlbelüftung, der Abfluss stossweise erfolgte. Man entschied sich infolgedessen für ein Schusswehr mit unter 1 : 1 (Abbildung 1) geneigtem Schussboden, wodurch das Anhaften des Strahls auch bei der grössten Wasserführung noch gesichert erschien, und daher eine Lüftungsvorrichtung entbehrlich wurde. Der abschiessende Strahl trifft den horizontalen Boden unter einem nicht ungünstigen Winkel, erreicht aber dabei eine Geschwindigkeit von rund 12 m/sek, deren Abbremsung auf eine normale Abflussgeschwindigkeit von etwa 4 m/sek bei Hochwasser nun in erster Linie anzustreben war.

Die Sihlüberführung der S. B. B. beim Umbau der linksufrigen Zürichseebahn in Zürich.

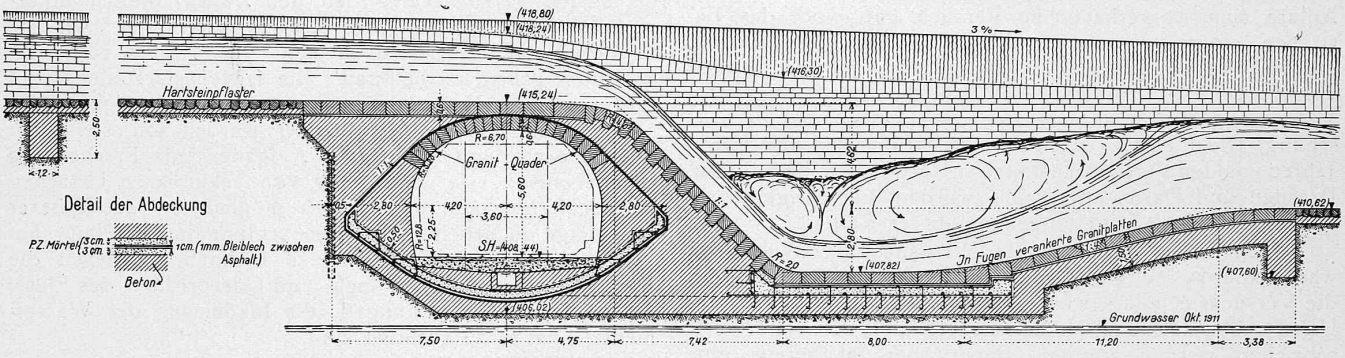


Abb. 1. Längsschnitt durch den Sihlüberfall unter schematischer Angabe des Wasserspiegels für 550 m³/sek. — Masstab 1 : 300.

Es standen hierzu zwei Mittel zur Verfügung, nämlich die Schaffung eines möglichst rauhen Unterwasserbettes, etwa durch Einbau von Chikanen[1]) oder aber die Anbringung eines vertieften Sturzbettes in unmittelbarem Anschluss an den Abschussboden. Von der ersten Lösung musste schon mit Rücksicht auf die gewaltsam in die Höhe geschleuderten Wassermassen infolge des Anpralls an die Chikanen und des damit verbundenen Geräusches abgesehen werden, weshalb die Anordnung eines vertieften Sturzbettes beschlossen wurde.

Die Modellversuche haben nun einwandfrei gezeigt, dass die Wirkung des Sturzbettes nicht etwa darin besteht, dass sich die Strömung in dem durch die Sohlenvertiefung vergrösserten Durchflussquerschnitt gleichmässig verteilt und mithin mit ermässigter Geschwindigkeit vor sich geht. Vielmehr schiesst der Wasserstrahl mit nur allmählich abnehmender Geschwindigkeit auf dem Boden des Sturzbeckens weiter, wobei er nur einen Teil der Wassertiefe des Beckens für sich beansprucht. Dabei ist er von einer um eine oder mehrere horizontale Axen rotierenden Wassermasse, der sog. Deckwalze, überlagert. In den untern Partien der Walze bewegt sich das Wasser in der Richtung des Strahls, in den obern dem Strahl entgegen. Die Arbeit, die gebraucht wird, um die Deckwalze in rotierender Bewegung zu erhalten, kann nur vom Strahl geleistet werden, dem also Energie entzogen wird (Abbildung 2).

Der Beweis dafür, dass die Energievernichtung in der Hauptsache der Walze zuzuschreiben ist, konnte am Modell durch Anbringung von Pitot'schen Röhren im Abschusstrahl unterhalb der Walze erbracht werden, indem die Wasserstände in den Pitot'schen Röhren direkt den Verlauf der Energielinie angeben[2]). Der stärkste Abfall der Energielinie konnte auf derjenigen Strahlstrecke festgestellt werden, die von der Deckwalze überlagert war,

[1]) *Forchheimer:* Hydraulik (1914, Seite 142), sowie: Grundriss der Hydraulik (1920, Seite 58); er nennt ein Gewässer mit «strömendem» Abfluss «Fluss», ein solches mit «schiessendem» Abfluss «Wildbach».

[2]) Betrachtungen über Abfluss, Stau- und Walzenbildung, Gutachten für die S. B. B., erstattet von *Th. Rehbock* im Dez. 1916 (im Druck 1917).

[3]) Dargestellt in der «Schweiz. Bauzeitung» vom 3. Nov. 1917.

[1]) Siehe Kraftwerk Mühleberg in «S. B. Z.», 16. Oktober 1920.

[2]) Die Energielinie wird dadurch erhalten, dass vom Wasserspiegel aus senkrecht nach oben die Geschwindigkeitshöhe $\frac{v^2}{2g}$ abgetragen wird.

während bei Versuchen, bei denen infolge spezieller Anordnungen keine Deckwalze auftrat, eine wesentliche Abnahme der Energie des Strahles nicht nachgewiesen wurde (Abbildung 3).

Damit die Bewegung des Abschuss-Strahles in die normale Abflussgeschwindigkeit des Unterwassers übergehe, muss ein Wechsel des Fliesszustandes, von der schiessenden zur strömenden Bewegung angestrebt werden. Dieser Uebergang kann niemals stetig vor sich gehen, sondern nur in Form eines sog. Wassersprungs (Wechselsprung) [1]). Die Lage des Wechselsprungs ergibt sich aus dem Schnittpunkt der beiden Energielinien für schiessenden und strömenden Abfluss. Die letzgenannte kann für gegebene Wassermenge, gegebenes Profil und gegebenes Sohlengefälle als festgelegt betrachtet werden; man kann infolgedessen die Lage des Wechselsprungs durch Aenderung der Neigung der Energielinie für den schiessenden Abfluss modifizieren. Je steiler diese Energielinie abfällt, um so früher muss der Schnitt beider Energielinien eintreten, um so früher tritt somit der Sprung ein. Das Fallen der Energielinie wird aber durch vermehrte Rauhigkeit des Bettes für den abschiessenden Strahl, niemals aber durch Anbringung eines glatten, langen Abfallbodens begünstigt, am besten jedoch dadurch, dass für das Auftreten einer Deckwalze gesorgt wird.

Damit sind die theoretischen Grundlagen für die Bestimmung der günstigsten Wehrform gegeben. Die rein rechnerische Bestimmung der Lage des Schnittpunktes der beiden Energielinien ist bis heute allerdings nur möglich, wenn keine Walzen auftreten[2]). Für den praktisch wichtigen Fall des Vorhandenseins einer Walze kann zur Zeit nur der Modellversuch zum Ziele führen, wobei es sich darum handelt, durch diesen Versuch bei sämtlichen zu erwartenden Wasserführungen bei gewählter Wehrform das Auftreten des Wassersprungs innerhalb der durch den sog. Abfallboden befestigten Flussohle zu sichern.

Grosse Aufmerksamkeit wurde hierauf bei den Versuchen der Ausbildung der seitlichen Begrenzung des Flussbettes gewidmet. Plötzliche Profilerweiterungen geben, wie durch Versuche festgestellt, Anlass zur schiessenden Bewegung bei ursprünglich strömendem Abfluss. Die beim schiessenden Abfluss stark vergrösserte Schleppkraft bedingt aber besondere Sohlensicherungen, die bei strömendem Abfluss unnötig werden. Es handelt sich deshalb darum, die Uebergänge von den flachen Ueberböschungen zu den steiler begrenzten Widerlagern so auszubilden, dass weder Wechsel des Fliesszustandes vom Strömen zum Schiessen, noch eine starke Wellenbildung eintritt (vergleiche den Grundriss Abb. 8 auf Seite 71). Die geeignete Form kann heute nur durch den Versuch, und zwar, wie später noch erörtert werden soll, in nicht zu kleinem Masstab gefunden werden.

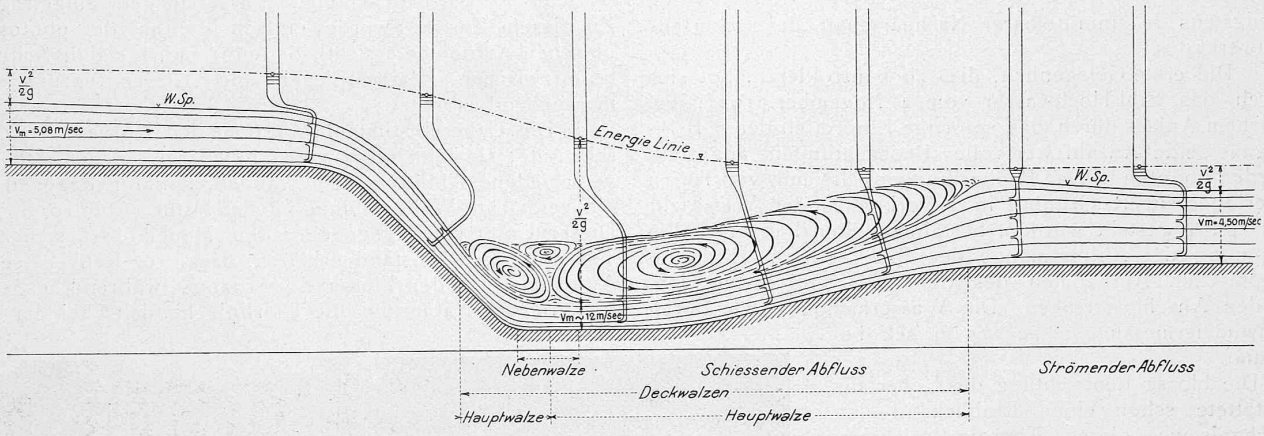


Abb. 2. Ermittelung der Länge der Energie-Linie mittels Pitot'scher Röhren am Modell.

Die Versuche für den Sihlüberfall wurden von Prof. Rehbock mit Vollmodellen im Masstab 1 : 100, mit Halbmodellen 1 : 50 und mit Modellstreifen zwischen parallelen Wänden im Masstab 1 : 25 durchgeführt. Die beiden letztgenannten Anordnungen gewähren neben dem Vorteil grösseren Modellmasstabes die Möglichkeit der Beobachtung des Abflussvorganges durch die Glasscheiben des Versuchsgerinnes; sie weisen aber etwas andere hydraulische Verhältnisse auf als das Vollmodell, weshalb nur die Versuchsergebnisse mit diesem als endgültig betrachtet wurden.

*

Es stellt sich nun die Frage: Inwiefern haben sich die auf Grund der Modellversuche vorausgesagten Bewegungserscheinungen am Sihlüberfall selbst bewahrheitet? Wir haben es hier mit einem rein hydraulischen Versuch zu tun. Die Flussohle ist gepflästert und somit unveränderlich, die untersuchte Flusstrecke ist verhältnismässig kurz, da die Beobachtung des Wasserspiegels sich zwar im Modell auf eine Länge von etwa 400 m erstreckte (200 m flussaufwärts und 200 m flussabwärts des Ueberfalls) als definitiv jedoch nur die Beobachtungen auf der Strecke von 35 m oberhalb bis etwa 128 m unterhalb des Ueberfalls betrachtet wurden, während die Anschlusstrecken sowohl flussaufwärts als flussabwärts vom Mitexperten Prof. G. Narutowicz rein rechnerisch ermittelt wurden. Nach dem eingangs über die Grenzen der Uebertragbarkeit des Modellversuchs gesagten, war eine brauchbare Uebereinstimmung zwischen Modell und Natur zu erwarten,

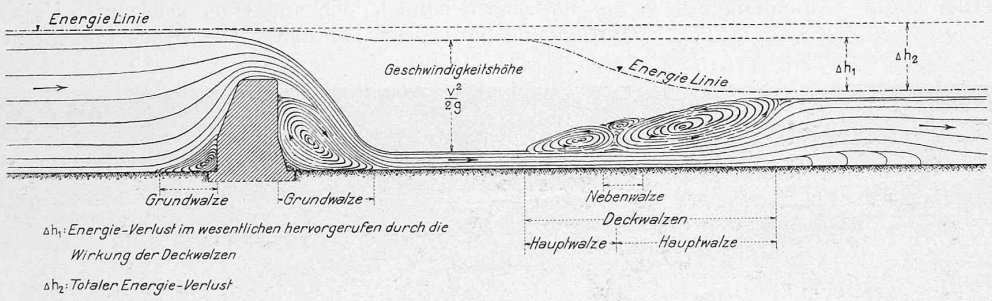
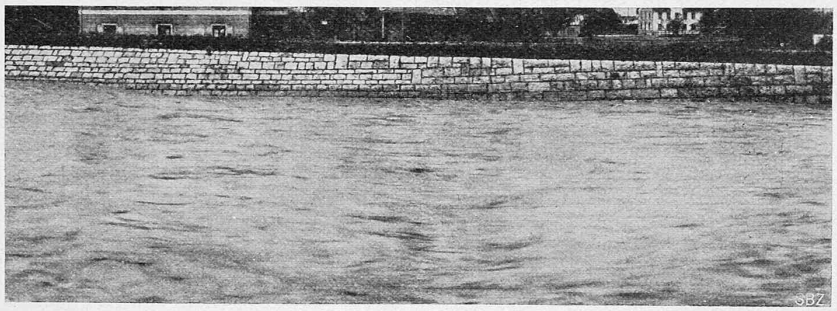


Abb. 3. Energie-Linie bei nur teilweise durch Deckwalzen überlagertem Strahl.

[1]) *Böss:* Berechnung der Wasserspiegellage beim Wechsel des Fliesszustandes (1919). *Julian Hinds:* The Hydraulic Jump and Critical depth in the design of Hydraulic Structures. «Eng. News Record», 25. Nov. 1920.

[2]) *Th. Rehbock:* Die Berechnung der Wasserspiegellage bei fliessenden Gewässern unter Berücksichtigung der in den Flussbetten auftretenden Wasserwalzen. «Die Wasserkraft», Heft 4 und 5, 1921.



Absenkung ↑ Abb. 4. Ansicht des Abschnittes im Oberwasser.

wenigstens in unmittelbarer Nachbarschaft des Ueberfallbauwerks.

Die erste Gelegenheit, dies zu kontrollieren, bot sich durch das Sihl-Hochwasser vom 4. November 1921, bei welchem Anlass durch das sofortige Eingreifen der S. B. B.-Organe eine Anzahl wertvoller Beobachtungen angestellt werden konnten. Diese Beobachtungen, die mir von Herrn Oberingenieur R. Grünhut in zuvorkommender Weise zur Verfügung gestellt wurden, bestanden einmal in einer Bestimmung der Abflussmenge der Sihl, sodann in photographischen Aufnahmen des Ueberfalls und der angrenzenden Anschlusstrecken. Die Wassermenge wurde durch Schwimmermessungen zu 215 m³/sek bestimmt.

Die blosse Beobachtung des Ueberfalls gestattete schon einen Einblick in den Mechanismus dieses Energievernichters. Flussaufwärts war eine ziemlich ausgeprägte Absenkung des Wasserspiegels etwa 40 m vor der Ueberfallkante sichtbar (Abb. 4, oben). Unmittelbar vor derselben konnte der stetig verlaufende Uebergang vom Strömen zum Schiessen an einer Art Kristallisation des Wasserspiegels beobachtet werden. Diese bei Messwehren wohlbekannte Erscheinung war beim Sihlüberfall insofern eigentümlich, als die im schiessenden Strahl gewissermassen erstarrenden Unregelmässigkeiten der Wasseroberfläche den Eindruck einer Karrenbildung erweckten. Der Wassersprung, etwa 5 m oberhalb des untern Endes des befestigten Sturzbeckens, zeigte sich in Form einer gewaltigen senkrecht aufsteigenden Quelle, deren Wassermassen sich flussaufwärts und flussabwärts überschlugen, unten in den noch durch heftige Querwellen charakterisierten strömenden Abfluss übergehend, nach oben stets aufs neue die Deckwalze speisend, deren rückläufige Bewegung sehr gut festgestellt werden konnte (Abbildungen 5, 6 und 7).

Für das blosse Auge zeigte somit der Abfluss eine bemerkenswerte Uebereinstimmung mit den am Modell beobachteten Erscheinungen. Von viel grösserer Bedeutung für den praktischen Wasserbau ist nun aber der Umstand, dass auch eine quantitativ sehr gute Uebereinstimmung zwischen Modell und Natur besteht.

Auf beistehendem Längenprofil (Abb. 9) wurde von den S. B. B. neben der durch den Modellversuch ermittelten Wasserspiegellage für eine Abflussmenge von 250 m³, der am 4. November entsprechend einer tatsächlichen Abflussmenge von 215 m³ beobachtete Wasserspiegel aufgetragen. Zu diesem Zwecke wurde einfach die auf der photographischen Aufnahme ersichtliche und ziemlich stabile Schnittlinie zwischen Wasserspiegel und Uferbegrenzung als massgebend erachtet.

Die Uebereinstimmung der beiden Kurven ist eine sehr gute; sie kann keine vollständige sein, da es sich um verschiedene Abflussmengen handelt, auffällig dagegen ist die verstärkte Wellenbildung in der Natur (Abb. 10, S. 72). Dieser Unterschied gegenüber dem Modell lässt sich zum Teil durch den Umstand erklären, dass Prof. Rehbock seine Aufnahme in der Flussaxe vornahm, während es sich hier in der Natur um die Uferlinie handelt, bei der die Rauhigkeit der Wandungen eine gegenüber der Mitte des Flusses erhöhte Wellenbildung begünstigte, was auch aus der Beobachtung der Photographien hervorzugehen scheint. Zum andern Teil muss der hervorgehobene Unterschied zwischen Modell und Natur dem kleinen Masstab des Versuchs zugeschrieben werden, indem beim kleinen Modell sich Wellen sekundärer Ordnung entweder nicht bilden können, oder nicht in Erscheinung treten.

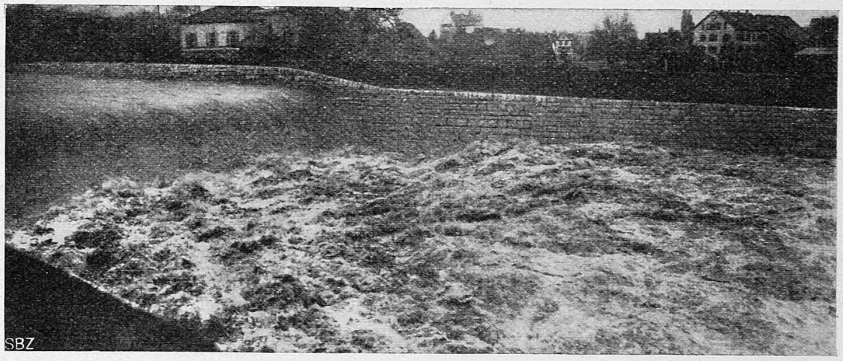


Abb. 7. Der Sihlüberfall am 4. November 1921. Die Deckwalze.

Im Ganzen kann jedoch von einer sehr guten Uebereinstimmung gesprochen werden. Die Beobachtung eines

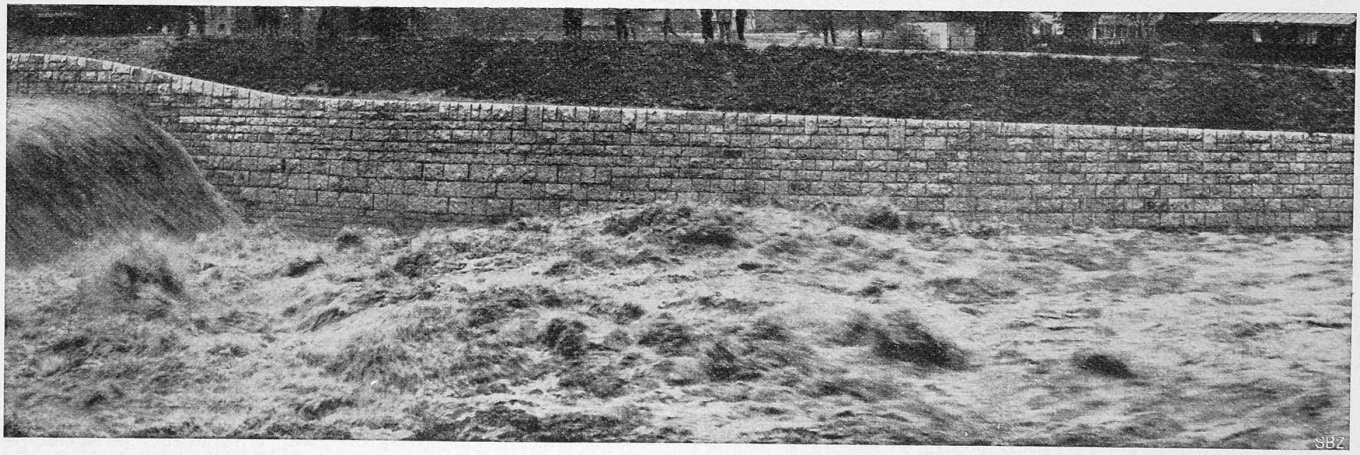


Abb. 5. Der Sihlüberfall in Zürich am 4. November 1921. — Ansicht des Abschnitts im Unterwasser (oberer Teil).

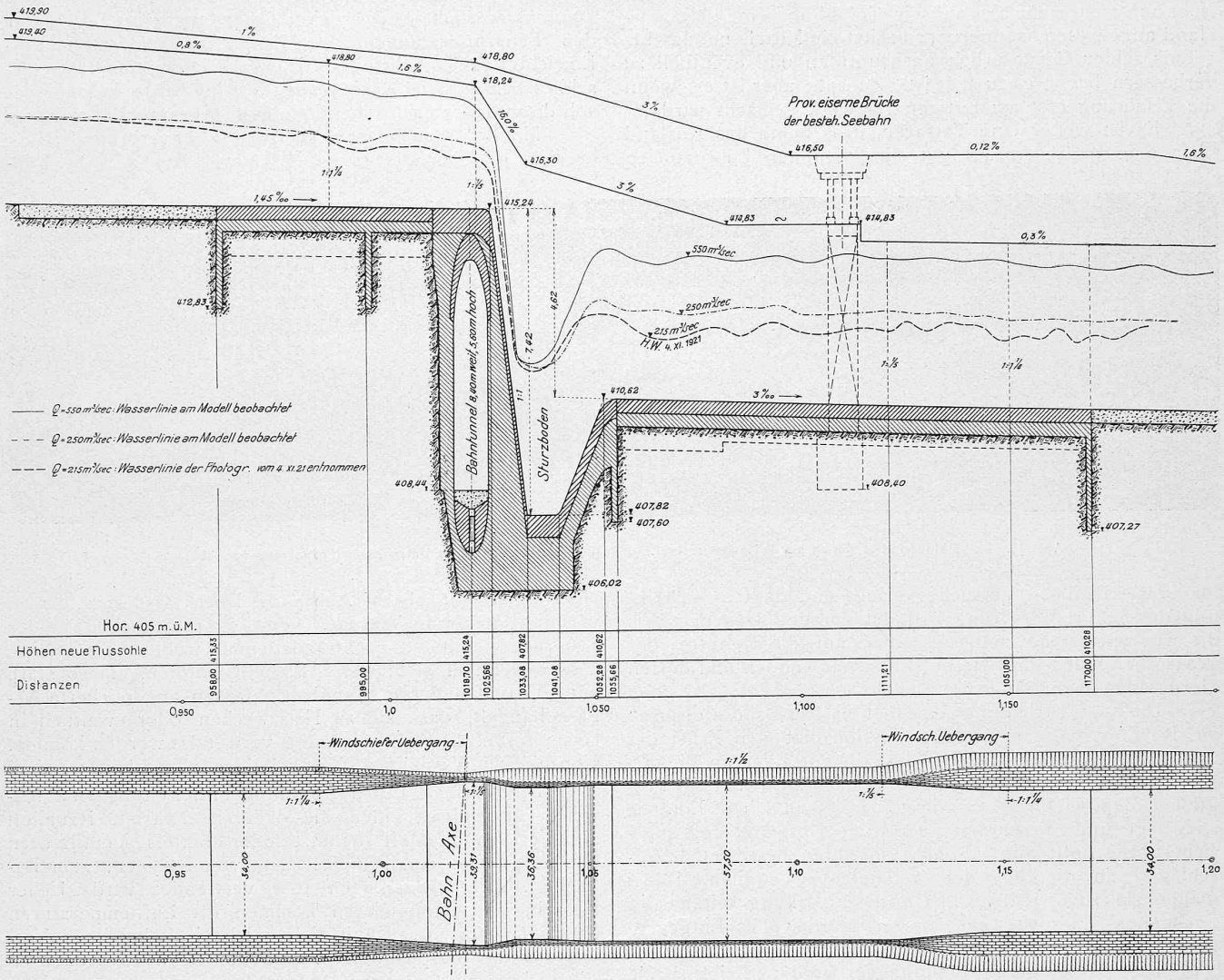


Abb. 8 und 9. Grundriss und Längsschnitt des Sihlüberfalls mit eingetragenen Wasserlinien. — Masstab der Längen 1 : 1500, der Höhen 1 : 150.

noch grössern Hochwassers[1]) könnte dieses Urteil bekräftigen, wobei es dann wünschenswert wäre, dass neben einer genauen Wassermessung nicht nur die Randlinie, sondern die ganze Gestaltung des Wasserspiegels etwa durch photogrammetrische Aufnahmen festgelegt würde. Der weitere Wunsch, auch die Form und Geschwindigkeit des Abschusstrahls durch Messung zu bestimmen, sowie auch die Gestalt der Deckwalze, wird auf grosse praktische Schwierigkeiten stossen; immerhin sollte wenigstens das Geschwindigkeitsdiagramm im beruhigten Unterwasser unmittelbar nach dem Sprung festgelegt werden. Eine bezügliche Anregung habe ich vor einiger Zeit an das Eidgen. Amt für Wasserwirtschaft gerichtet.

Eines aber steht heute schon fest: Wir besitzen im Sihlüberfall einen Beweis für die Verwendbarkeit der Modellversuche. Dem projektierenden Ingenieur öffnet sich durch diese Tatsache ein neuer Weg. Beim Studium zahlreicher schwieriger Probleme des praktischen Wasserbaues

[1]) Die Versuche in Karlsruhe sind für Abflussmengen entsprechend 50, 250, 400, 550 und 700 m³/sek durchgeführt worden.

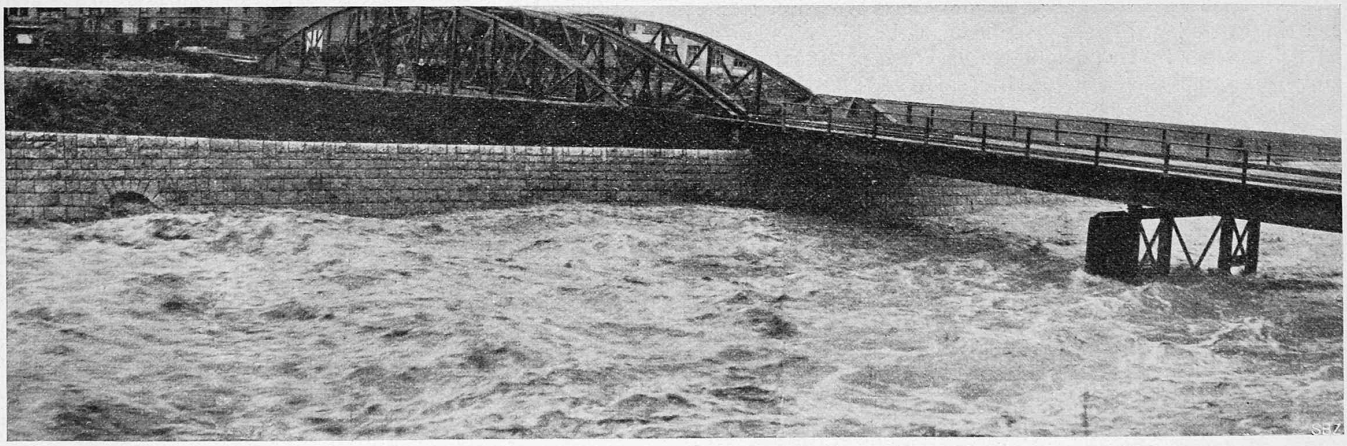


Abb. 6. Der Sihlüberfall in Zürich am 4. November 1921. — Ansicht des Abschnittes im Unterwasser (Fortsetzung von Abb. 5).

ist er nun nicht mehr blos auf sein Gefühl und eine glückliche Hand angewiesen, sondern er besitzt ein Mittel, um das Ergebnis seiner Geistesarbeit nachzuprüfen und eventuell zu verbessern bevor es zu spät ist. Zu spät aber ist es, wenn die Erfahrung erst am fertigen Bauwerk gemacht wird.

Es ist weiter eine Tatsache, dass heute das Ausland über eine ganze Anzahl gut eingerichteter Laboratorien für wasserbauliche Versuche verfügt und dass es sich infolgedessen im Vorsprung befindet gerade uns gegenüber, die wir, wie wenig andere Länder, auf die Kenntnis der Wasserbewegung angewiesen sind. Wir können und dürfen hierin nicht mehr länger zurückbleiben.

Die zur Errichtung eines „Flussbau-Laboratoriums" an der E. T. H. ernannte Kommission hat den Ernst der Lage voll erkannt, und sich deshalb mit Eifer an die Erledigung der gestellten Aufgabe gemacht. Sie hat ihr Programm dem Schweiz. Schulrat bereits in einer Eingabe vorgelegt und dieser hat tatkräftige Unterstützung zugesichert. Sie hofft nun in Bälde mit ihren bestimmten Vorschlägen an die Behörden gelangen zu können. Dabei glaubt sie zuversichtlich, auf die Mitwirkung seitens der Fachgenossen, sowie auf ein verständnisvolles Entgegenkommen der obersten Behörden rechnen zu dürfen.

Die beigefügten Abbildungen verdanke ich nachfolgenden Quellen: Abbildungen 2 u. 4, Gutachten von Prof. Rehbock: „Abfluss, Stau und Walzenbildung bei fliessenden Gewässern"; Abbildung 3, Vortrag von Prof. Rehbock im Haag, 1921; Abbildungen 4, 5, 6, 7, 9 und 10 wurden mir von den S. B. B. zugestellt.

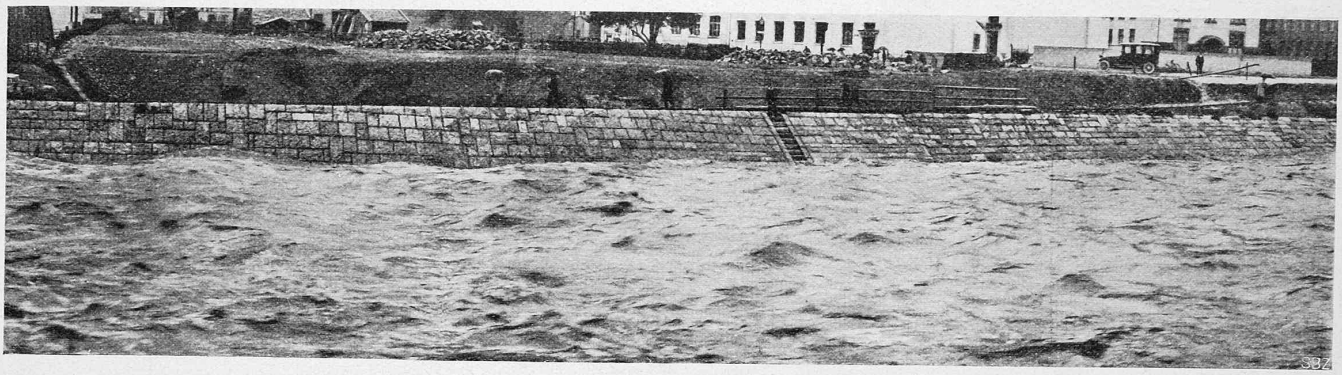


Abb. 10. Der Sihlüberfall in Zürich am 4. November 1921. — Ansicht des Abschnitts im Unterwasser (Fortsetzung von Abb. 6).

Abwärmeverwertung

von Privatdozent *M. Hottinger*, Ingenieur, Zürich.

(Fortsetzung von Seite 279 letzten Bandes.)

II. Rauch- und Auspuffgas-Verwertung.

Bei Feuerungsanlagen sind die folgenden drei Arten von Verlusten zu unterscheiden: *Kaminverluste* (beim Dampfkesselbetrieb z. B. 10 bis 30 % des Heizwertes der Kohle; bei industriellen Feuerungsanlagen u. U. bis über 60 %) a) zufolge der freien oder fühlbaren Wärme; b) zufolge der unverbrannten Gase (CO, CH_4, C_2H_4, H_2); c) zufolge des abziehenden Wasserdampfes. — *Verlust durch Rückstände* (1 bis 3 %). a) durch unverbrannte Teile in Schlacken und Asche; b) durch Russ (mitgerissener Kohlenstoff). — *Verluste durch Leitung und Strahlung* (bei normalem Dampfkessel-Betrieb z. B. 5 bis 8 %, bei schwachem Betrieb bis 20 %; bei Entgasungsöfen in Gaswerken, Glühöfen unter Umständen bis 40 %).

In erster Linie ist es natürlich Sache der Feuerungstechnik, die Konstruktionen und Anordnungen der Feuerungsanlagen so zu treffen, dass diese Verluste möglichst klein ausfallen. Ebensowichtig sind aber auch die Wahl geeigneter Brennstoffe und sorgfältige Bedienung der Anlagen. Trotz all dieser Massnahmen lässt es sich jedoch nicht erreichen, dass die Verluste ohne Beeinträchtigung des Betriebes unter gewisse Beträge herabgemindert werden können, weshalb es an vielen Orten angezeigt ist, hinter den Feuerungsanlagen besondere Abwärmeverwertungs-Einrichtungen anzubringen. Diese beziehen sich fast ausschliesslich auf die Ausnützung der fühlbaren Wärme; es soll diese daher nachstehend einlässlich besprochen werden.

Mit den Rauchgasen abziehende unverbrannte Gase ergeben oft ebenfalls grosse Wärmeverluste, z. B. bei Füllfeuerungen mit oberm Abbrand. Doch lässt sich die so verloren gehende Wärme, wenn es nicht schon in der Feuerung geschieht, nachträglich nicht wohl rückgewinnen, ausser wenn es sich, wie z. B. bei Gichtöfen, um so stark mit CO und anderen brennbaren Gasen angereicherte Abgase handelt, dass sie zu Heizzwecken oder eventuell in Gasmotoren zur Krafterzeugung verwendet werden können. Von diesen Ausnahmefällen soll hier abgesehen werden.

Die Verluste durch Strahlung und Leitung sind teilweise verwendbar, indem die dadurch erwärmte Raumluft als Verbrennungsluft benützt oder mittels Ventilatoren abgesaugt und zur Temperierung von Räumen, zum Betriebe von Trockenanlagen usw. verwendet wird. Ueber Kesseln und Economisern kommen oft Lufttemperaturen bis zu 60° C vor. Kühlt sich solche Luft bei ihrer Verwertung auf beispielsweise 20° C ab, so werden dadurch rd. 10 kcal/m³ gewonnen, sodass etwa 450 m³ dieser Luft die gleiche Nutzwärme wie 1 kg Kohle (4500 kcal) ergeben.

Die Verluste durch unverbrannte Kohlenteile machen, wenn geeignete Brennstoffe zur Verfügung stehen, nicht viel aus. Ergibt ein Brennstoff mit einem Heizwert von 7000 kcal beispielsweise 9 % Asche, die 15 % Verbrennbares enthalten, so gehen dadurch pro kg Brennmaterial $0{,}09 \times 0{,}15 \times 7000 = 95$ kcal oder 1,4 % des Wärmeinhaltes der Kohle verloren. In besonderen Fällen werden die unverbrannten Teile wieder verwendet.

Im ersten Teil dieser Arbeit wurde bereits darauf hingewiesen, dass es Feuerungen gibt, bei denen die Rauchgase mit sehr hohen Temperaturen in das Kamin abziehen. Aus Dampfkesseln ohne Economiser entweichen sie oft mit 300° C und mehr, aus Schweiss-, Glüh-, Schmelzöfen und drgl. manchmal mit 600 bis 700° C, aus den Oefen der Zement-, keramischen- und Glas-Industrie mit 500 bis 1000° C, und die Abgase hinter den Gaswerk-Retorten-Oefen (vor den Rekuperatoren) weisen ebenfalls Temperaturen um 1000° herum auf. Die dadurch bedingten Verluste sind sehr beträchtlich. Handelt es sich um Steinkohle, so betragen sie bei vollkommener Verbrennung für je 100° C Temperatur-Unterschied zwischen Rauchgasen und Verbrennungsluft[1]) bei einem:

Luftüberschuss gleich dem	1,0-,	1,5-,	2,0-,	2,5-fachen der theoret. Luftmenge	
Ungefähr	4,	5,9,	7,8,	9,8 % des Heizwertes der Kohle.	

Bei einem 1,5- bis 2,0-fachen Luftüberschuss, wie er bei festen Brennstoffen meist vorkommt, sind also für den Verlust an fühlbarer Wärme auf je 100° C Ueber-Temperatur 6 bis 8 % zu rechnen, sodass bei beispielsweise

[1]) Vergl. *W. Schüle*, Leitfaden der technischen Wärmemechanik 1917, S. 49