**Zeitschrift:** Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria

**Herausgeber:** Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband

**Band:** 88 (1996)

**Heft:** 3-4

**Artikel:** Ermittlung der möglichen Produktionserhöhung für das Kraftwerk Klingnau

**Autor:** Bächli, Leonhard / Becke, Ludwig

**DOI:** https://doi.org/10.5169/seals-940336

**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:** 23.01.2026

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

# Ermittlung der möglichen Produktionserhöhung für das Kraftwerk Klingnau

*Leonhard Bächli und Ludwig Becke*

## Einleitung

Dieser Aufsatz beschreibt am Beispiel eines grösseren Flusskraftwerkes die einzelnen Etappen bei der Evaluation der möglichen Produktionserhöhung. Da bei vielen alten Kraftwerken die Verhältnisse ähnlich sind wie bei Klingnau, kann die beschriebene Vorgehensweise als Modell für ähnliche Aufgaben herangezogen werden.

Die drei vertikalachsigen Kaplanturbinen des Kraftwerkes Klingnau wurden im Jahr 1934 eingebaut. Zwei Einheiten wurden bei Escher Wyss, Schweiz, die dritte bei Voith, Deutschland, hergestellt.

Gleichzeitig mit der Erneuerung der elektromechanischen Einrichtungen und Automatisierung der Anlage sollte die jährliche Energieproduktion durch einen eventuellen vorgezogenen Ersatz der Laufräder erhöht werden.

Damit die maximal mögliche Produktionssteigerung festgelegt werden konnte, hat der Eigentümer der Anlage, die Aarewerke AG, Klingnau, 1990 entschieden, ausführliche und umfassende Turbinenmodellversuche durchzuführen. Die Versuche bestanden darin, komplette Messungen eines homologen Turbinenmodells mit bestehendem Laufrad und mit einem neuentwickelten Laufrad durchzuführen. Somit konnte das Produktionspotential bei Ersatz der Laufräder genau ermittelt werden.

Es waren zwar frühere Modellversuchsresultate vorhanden; weil aber das Modell nicht genau der Grossausführung entsprach, waren sie nicht brauchbar.

Infolge von Abweichungen zwischen den ausgeführten Turbinen und den Originalzeichnungen sowie Modifikationen und Reparaturen an den Laufradschaufeln war eine komplette Vermessung der hydraulischen Turbinenkontur und der Schaufeln erforderlich. Diese ergab sehr genaue Resultate, ohne dass der Laufradmantel entfernt werden musste.

Der Eigentümer wollte sich die Option offenlassen, die «Software» (hydraulische Laufschaufelkontur d.h. Modellversuche) und die «Hardware» (Laufschaufeln) getrennt auszuschreiben. Dieses ungewöhnliche Vorgehen beeinflusste den Inhalt der Spezifikation für die Modellversuche. Besondere Aufmerksamkeit wurde den Kapiteln «Garantien» und «Pönalen» geschenkt.

Der Vergleich der jährlichen Energieproduktion mit dem «alten» und dem «neuen» Laufrad erlaubte, die Wirtschaftlichkeit zu beurteilen. Der schlechtere Zustand des ursprünglichen Laufrades wurde durch eine reduzierte Wirkungsgradaufwertung berücksichtigt.

## 1. Vorgeschichte

Das Flusskraftwerk Klingnau wurde in den Jahren zwischen 1931 und 1935 für total 41 Mio Franken gebaut (Bild 1).

Es ist das letzte Kraftwerk an der Aare vor deren Mündung in den Rhein bei Koblenz. Im Juli 1935 erfolgte die Inbetriebnahme der drei Maschinengruppen. Die Konzession wurde bis 2015 erteilt. Die technischen Hauptdaten sind in der Tabelle 1 zusammengestellt.

### 1.1 Zweck der Untersuchung

Für die Ermittlung der Investitionen und Betriebskosten bis zum Konzessionsende waren genaue Kenntnisse über den Zustand des Kraftwerkes erforderlich. Daneben sollten Massnahmen für die Erhaltung der Verfügbarkeit und zur Produktionserhöhung vorgeschlagen und auf ihre Wirtschaftlichkeit untersucht werden.

## 2. Verfahren zur Ermittlung der Produktionserhöhung durch Laufradersatz

Das Verfahren kann in zwei Teile gegliedert werden:
- Erfassung der Kennlinie der bestehenden Turbine
- Ermittlung der Charakteristik der Turbine mit neuem Laufrad.

Mit diesen beiden Kennlinien und der Abflussdauerkurve werden die mittleren jährlichen Energieproduktionen gerechnet, und die Differenz ergibt das Verbesserungspotential.

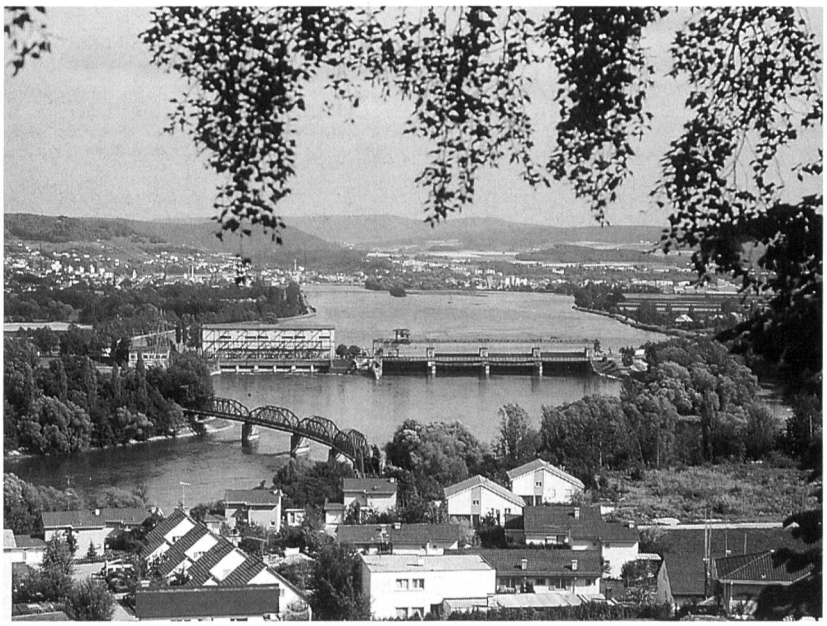

Bild 1. Das Kraftwerk Klingnau mit der Wehranlage vom Unterwasser gesehen.

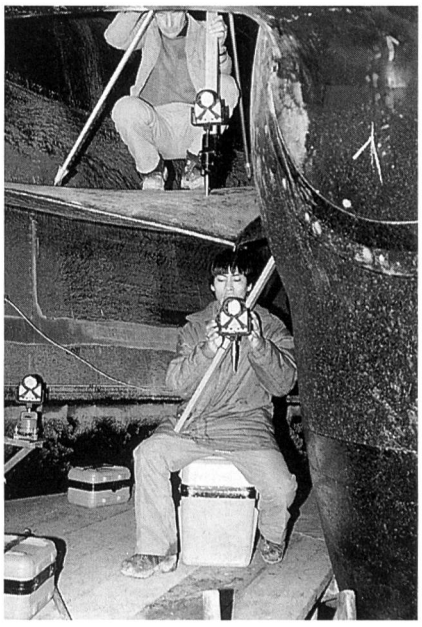

Bild 2. Vermessung der Laufschaufelkontur.

Tabelle 1. Technische Hauptdaten.

| | | |
|---|---|---|
| Gruppenzahl | – | 3 |
| Nettofallhöhe | m | 4,7–7,3 |
| Laufraddurchmesser | m | 6,46 |
| Drehzahl | $min^{-1}$ | 75 |
| Max. Volumenstrom pro Gruppe | $m^3/s$ | 270 |
| Max. Leistung pro Gruppe | MW | 14,3 |

## *2.1 Bestimmung der Kennlinien der «alten» Gruppen*

Prinzipiell kann zwischen folgenden drei Methoden gewählt werden:
- Basierend auf vorhandenen Dokumenten
- Basierend auf Anlagemessungen
- Basierend auf Modellversuchen.

### *2.1.1 Basierend auf vorhandenen Unterlagen*

Für die Untersuchungen standen zur Verfügung:
- Werkvertrag von 1932
- Modellentwicklungsversuche von 1931
- Leistungsmessungen in der Anlage von 1936
- Auswertung spezifischer Betriebsdaten.

Obwohl feststand, dass nach den Modellversuchen 1931 noch Modifikationen am Laufrad Klingnau ausgeführt worden waren, wurden diese nach IEC aufgewerteten Modellergebnisse mit dem Wirkungsgrad des Werkvertrages verglichen. Tatsächlich betrugen die Abweichungen je nach Beaufschlagung zwischen 1 und 4 %. Deshalb wird eine mittlere «Aussagegenauigkeit von ±3 % angenommen.

Aus den Leistungs- und Fallhöhenmessungen in der Anlage sowie der Bestimmung des Volumenstromes über eine Pegelmessung in der Limnigraphenstation Untersiggenthal-Stilli im Jahre 1936 wurde der Anlagenwirkungsgrad berechnet. Diese damals gemessenen Wirkungsgrade liegen etwa 5 % tiefer, als für eine neue Maschinengruppe erwartet werden könnte. Allerdings liegt auch die Unsicherheit für eine solche Messung zwischen 2 und 5 %. Für die Beurteilung wird eine mittlere Messunsicherheit von ±3,5 % angenommen.

### *2.1.2 Basierend auf Messungen in der Anlage*

Exakte Messungen von Leistung, Fallhöhe und Volumenstrom in der Anlage zur Erfassung der Maschinencharakteristik sind sehr zeitaufwendig (es muss bei verschiedenen Gefällen, d. h. Aareabflussmengen, gemessen werden) und teuer, und die Messunsicherheit für den Wirkungsgrad ist mit ±2 % hoch.

### *2.1.3 Basierend auf Modellversuchen*

Versuche am Modell ergeben die genauesten Resultate (Messunsicherheit kleiner als ±0,5 %); lediglich durch das Aufwerteverfahren der Modellresultate auf die Grossausführung ergibt sich eine zusätzliche Unsicherheit. Handelt es sich um die Ermittlung einer Differenz und werden beide Varianten durch Modellversuche am gleichen Prüfstand ermittelt, eliminiert sich sowohl der systematische Fehler wie auch die Unsicherheit der Aufwertung.

Bei der Herstellung des Turbinenmodells erhebt sich im-

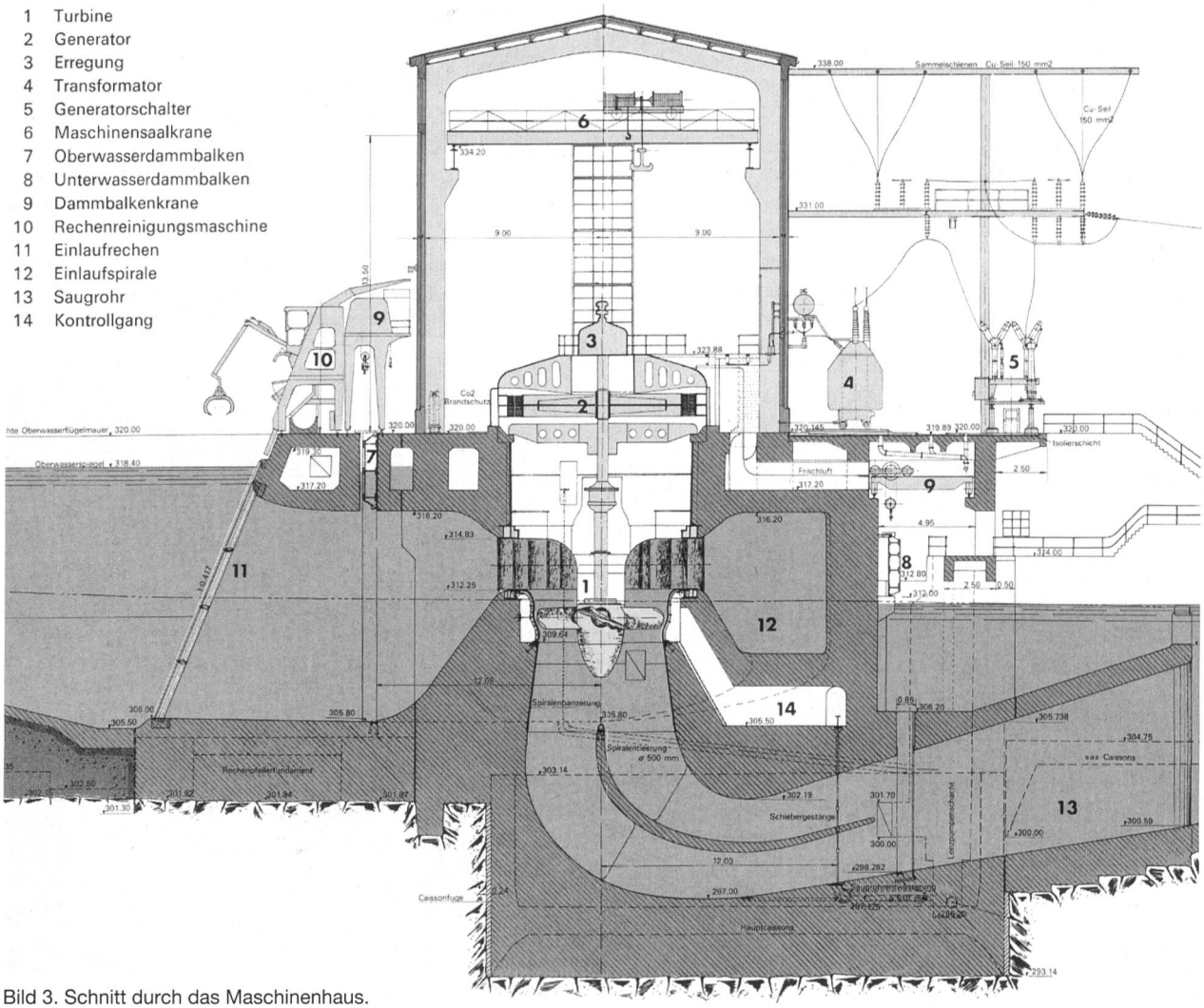


Bild 3. Schnitt durch das Maschinenhaus.

mer die Frage, ob es nötig sei, alle Turbinenkomponenten geometrisch genau nachzubilden, oder ob vorhandene Modellteile verwendet werden können. Ein Vergleich mit einer moderneren Turbinenkontur – so wie sie bei Voith und Sulzer-Escher Wyss in den letzten Jahrzehnten bestehen – hat gezeigt, dass die Abweichungen gross sind und dass es daher vorteilhaft ist, die hydraulische Kontur der gesamten Turbine nachzubilden (Bild 3).

## *2.2 Ermittlung der Charakteristik der Turbine mit neuem Laufrad*

Wiederum gibt es drei Möglichkeiten, die Kennlinie zu ermitteln:

- Basierend auf Resultaten kürzlich durchgeführter Modellversuche für eine Anlage ähnlich zu Klingnau und rechnerische Berücksichtigung der Unterschiede in der geometrischen Kontur
- Rein rechnerisch
- Modellversuche mit einem der Anlage genau nachgebildeten Modell.

### *2.2.1 Basierend auf vorhandenen Versuchsresultaten*

Aus der Vielzahl der bei Lieferanten vorhandenen Modellversuchsresultate wird eine für Klingnau optimale Charakteristik gewählt, und die geometrischen Abweichungen werden – ebenfalls basierend auf früheren Versuchsresultaten – rechnerisch berücksichtigt.

Obwohl dieses Vorgehen den geringsten Aufwand erfordert, dürfte seine Genauigkeit im Hinblick auf das den heutigen Verhältnissen nicht entsprechende Saugrohr bestenfalls bei ±1 % liegen.

### *2.2.2 Rechnerische Ermittlung der «neuen» Kennlinie*

Die Genauigkeit des analytischen Verfahrens hat sich in den letzten Jahren stark verbessert. Deshalb wird die Methode, vor allem bei kleinen Anlagen, immer häufiger angewandt. Falls Wirkungsgrade garantiert werden müssen, ist aber die Toleranz noch immer zu gross, vor allem wenn es sich wie bei Klingnau um ein nicht ganz optimales Saugrohr handelt.

### *2.2.3 Basierend auf Modellentwicklungsversuchen mit einem homologen Modell*

Bei diesen Versuchen wird in erster Linie ein von früheren Modellen vorhandenes oder analytisch neu entwickeltes Laufrad im Turbinenmodell Klingnau optimiert.

In zweiter Linie könnte der Laufradaussendurchmesser um wenige Prozent vergrössert werden, was sowohl zu einer Wirkungsgradverbesserung im Vollastbereich als auch zu einer Vergrösserung der maximalen Durchflussmenge und damit zu einer Erhöhung der Nutzung der vorhandenen Wassermengen führt. Dies bedingt allerdings für die Grossausführung einen neuen Laufradmantel und Anpassungsarbeiten am unteren Leitschaufelring und oberen Saugrohrkonus. Von dieser Möglichkeit wurde z. B. im Kraftwerk Rupperswil Gebrauch gemacht; im Falle von Klingnau wurde darauf verzichtet.

In dritter Linie können Mängel der anderen Turbinenkomponenten aufgespürt und Verbesserungsmöglichkeiten ermittelt werden. Diese könnten dann an der Grossausführung realisiert werden, sofern sich diese Verbesserungen mit akzeptablem Aufwand verwirklichen lassen. Vor allem könnte zum Beispiel die horizontale Rippe im Saugrohr zurückgeschnitten oder es könnte die Saugrohrkontur durch örtlichen Materialauftrag optimiert werden usw. Wie weit man mit den Änderungen geht, hängt zum Teil von den Zwischenresultaten der Modellversuche ab und kann erst im Verlauf der Versuche bestimmt werden.

Die Messunsicherheit für den Wirkungsgrad ist mit ±0,5 % bei dieser Methode am kleinsten.

## *2.3 Ermittlung der Produktionserhöhung*

Durch Kombination der Methoden zur Ermittlung des Istzustandes und des Neuzustandes ergeben sich eine Vielzahl von Varianten, d. h. möglichen Verfahren zur Bestimmung des Erhöhungpotentials. Tabelle 2 gibt eine Übersicht über diese Varianten.

*Variante A*

Der Istzustand basiert auf vorhandenen Unterlagen, der Neuzustand auf vorhandenen Messungen an einer Modellturbine, die sich für die Bedingungen, wie sie bei Klingnau vorkommen, möglichst gut eignet.

Diese billigste Variante hat den Nachteil, dass die Unsicherheit für den Wirkungsgrad grösser als ±4 % ist und damit in der Grössenordnung des erwarteten maximalen Modernisierungspotentials von 5 % zu liegen kommt. Sie scheidet somit aus.

*Variante B*

Der Istzustand wird durch neue genaue Anlagenmessungen bestimmt. Der Neuzustand wird über vorhandene Messungen an einer Modellturbine angenommen, die sich für die Bedingungen, wie sie bei Klingnau vorkommen, möglichst gut eignet. Diese sehr teure Variante ist bezüglich Genauigkeit kaum besser als Variante A.

*Variante C*

Der Istzustand wird durch neue genaue Messungen in der Anlage bestimmt. Der Neuzustand wird durch Messungen an einem homologen Modell festgelegt. Diese Variante ist mit einer Messunsicherheit von ±2,5 % genauer als die

Tabelle 2. Verschiedene Varianten, um die mögliche Produktionserhöhung für das Kraftwerk Klingnau zu ermitteln.

| Varianten | Ermittlung der Kennlinie für die gegenwärtige Turbine | Ermittlung der Kennlinie für Turbine mit neuem Laufrad | Erwartete Genauigkeit | Kosten |
|---|---|---|---|---|
| A | Basierend auf Modellversuchen von 1931 | Basierend auf Versuchen an einem nicht homologen Modell und rechnerische Berücksichtigung der geometrischen Unterschiede | ±4 % | tief |
| B | Neue Messungen in der Anlage | Basierend auf Versuchen an einem nicht homologen Modell und rechnerische Berücksichtigung der geometrischen Unterschiede | ±3 % | hoch |
| C | Neue Messungen in der Anlage | Versuche mit einem homologen Modell | ±2,5 % | sehr hoch |
| D | Versuche mit einem homologen Modell | Versuche mit einem homologen Modell | ±0,5 % | mässig |

Vorgenannten, aber dafür die teuerste. Gleichzeitig ist sie unnötig, weil beim Erstellen eines Modells homolog zu Klingnau ohne allzu grossen Mehraufwand auch der Istzustand an diesem Modell genau ermittelt werden kann.

*Variante D*
Sowohl der Istzustand wie auch der Neuzustand werden über vergleichende Modellversuche bestimmt. Dieses Verfahren hat gegenüber den anderen folgende Vorteile:
- Systematische Messfehler werden eliminiert
- Keine Fehler durch Aufwerteverfahren
- Grösste Genauigkeit
- Sicherste Garantiewerte
- Akzeptable Kosten.

Da für Klingnau weder das genaue Laufschaufelprofil noch die Turbinenkontur bekannt waren, ergab sich allerdings bei dieser Variante ein Aufwand, der die Gesamtkosten zusätzlich erhöhte.

Der Vergleich der 4 Varianten zeigt, dass diese letzte Methode D bezüglich Kosten und Genauigkeit ein Optimum darstellt.

## 3. Modellvergleichsversuche

Ist die Entscheidung zugunsten von Modellversuchen gefallen, kann mit den Vorbereitungen begonnen werden.

Meist sind nur unvollständige Zeichnungen vorhanden oder es besteht der Verdacht, dass die Ausführung von der Zeichnung abweicht; deshalb sind zumindest die Hauptdimensionen der Turbine zu vermessen. Eine Laufschaufelvermessung wird praktisch immer erforderlich sein, da das Profil wegen Kavitation und Abrasion oft «nachgearbeitet» werden musste und deshalb von einer eventuell vorhandenen Zeichnung abweicht. Da in den letzten Jahren Vermessungsverfahren entwickelt wurden, die eine exakte Vermessung der Schaufel im eingebauten Zustand in wenigen Tagen ermöglichen (Bild 2), besteht auch von der Kostenseite kein Grund, diese Arbeit nicht durchzuführen.

Die Vermessung der Turbinenschaufeln im Kraftwerk Klingnau erforderte eine Kombination von klassischer Vermessung mit den Methoden der Industrievermessung. Wegen der engen Platzverhältnisse wurden an der Gehäusewand Konsolen installiert, welche die sichere Stationierung der Messinstrumente ermöglichten.

Von zwei Theodolitstandorten aus konnten Punkte mit Winkeln berührungslos eingeschnitten werden. Bei sehr schwierigen Visuren wurden zudem Entfernungen mit Infrarotdistanzmessern gemessen. Mit diesem Vorgehen konnte die Oberfläche der ganzen Turbinenschaufel Punkt um Punkt abgegriffen und als Punktplot dargestellt werden. Im Falle von Klingnau hat die Vermessung die Vermutung, dass starke Abweichungen gegenüber den Zeichnungen bestehen, bestätigt.

Dann sind die Modellversuche auszuschreiben. Dabei gibt es mehrere Möglichkeiten: Es können nur Modellversuche oder die gesamte Turbinenmodernisierung inklusive Modellversuche spezifiziert werden.

Ein neues Laufrad kann nur von einem Turbinenlieferanten entwickelt werden, hingegen kann die Garantie durch Modellabnahmeversuche sowohl im Labor des Lieferanten wie auch in einem neutralen Labor nachgewiesen werden.

Wird die Modernisierung zusammen mit den Entwicklungsversuchen ausgeschrieben, muss eine «Rücktrittsklausel» für den Fall, dass die Resultate der Versuche eine Modernisierung nicht rechtfertigen sollten, in die Spezifikation eingebaut werden.

Im Falle von Klingnau hatte man sich für separate Ausschreibungen für die Modellversuche und für die Turbinenmodernisierung entschieden. Die Variante mit Abnahmeversuchen in einem neutralen Labor wurde in Anbetracht der vollständigen Akzeptierung der Pflichtenheftauflage durch den Lieferanten und aus Kostengründen fallengelassen.

Dieses Vorgehen verlangt aber eine sorgfältige Spezifikation, besonders in 3 Punkten:
- Mit Pönalen behaftete Umsetzung der Modellresultate auf die Grossausführung.
- Die Resultate müssen Dritten zugänglich gemacht werden dürfen.
- Die Pönalen, die auf Mängel in der hydraulischen Kontur zurückzuführen sind, können nicht dem Lieferanten der neuen Laufräder belastet werden, sofern die Herstellungstoleranzen für die zu erneuernden Turbinenkomponenten eingehalten sind.

### 3.1 Resultate der Modellversuche

Die Resultate der Modellversuche können wie folgt zusammengefasst werden:
- Die «alte» Turbine ist besser, als nach den vorhandenen Unterlagen angenommen werden durfte.
- Die verbleibenden Turbinenkomponenten, vor allem das Saugrohr, verhindern, dass durch Laufradersatz der Wirkungsgrad von einer neuzeitlichen Kaplanturbine erreicht wird.
- Mit geringfügigen Änderungen am Saugrohr konnte keine Verbesserung erreicht werden.

### 3.2 Auswertung der Modellversuche

Es erfolgte eine unterschiedliche Aufwertung der Modellresultate mit «altem» und mit «neuem» Laufrad, um den Zustand der «alten» Komponenten, wie z. B. grosse Rauhigkeit der neuen Laufradoberfäche, grosses Spiel zwischen altem Laufrad und Laufradmantel usw., zu berücksichtigen. Es wurde um 1 % weniger aufgewertet.

Anschliessend wurden mit beiden Muschelkurven die mittleren Jahresproduktionen berechnet (Tabelle 3); diese dienten als Entscheidungsgrundlagen.

## 4. Schlussfolgerungen

Die Abklärungen und Versuche haben gezeigt, dass genaue Resultate über die noch mögliche Produktionserhöhung in einem Kraftwerk mit verbleibenden Turbinenkomponenten nur mit exaktem Vergleich des Ist-Soll-Zustandes mit Modellversuchen erreichbar sind.

Für die Ist-Modellversuche sind die Turbinenkonturen ab Einlaufrechen bis Ende Saugrohr wie auch das Laufrad zu vermessen, mit den Originalzeichnungen zu vergleichen und das Modell der Ausführung entsprechend zu erstellen.

Die für das Kraftwerk Klingnau durch die Ist-Soll-Versuche ermittelte Mehrproduktion beträgt unter Zugrundelegung der langjährigen mittleren Aare-Wasserführung nur 2,71 %.

Aufgrund dieser geringen Mehrproduktion und des noch guten Zustandes der Turbinenanlagen wurde entschieden,

Tabelle 3. Ertüchtigungspotential für das Kraftwerk Klingnau.

| Turbinenlaufrad | Mittlere jährliche Energieproduktion | Ertüchtigungspotential |
|---|---|---|
| Mit bestehendem Laufrad ($Q_{max}$ = ca. 3×270 m³/s) | 230,2 GWh | – |
| Mit neuem Laufrad ($Q_{max}$ = ca. 3×270 m³/s) | 233,6 GWh | +1,5 % |
| Mit neuem Laufrad ($Q_{max}$ = ca. 3×300 m³/s) | 236,4 GWh | +2,7 % |

die Laufschaufeln bzw. die Laufräder erst zu erneuern, wenn dies betriebsbedingt erforderlich wird, und die elektromechanischen Anlagen zu ertüchtigen; die mechanischen Turbinenregler durch elektronische Regler zu ersetzen sowie die Steuerung und Leittechnik für einen unbemannten Betrieb zu erstellen.

Das phasenweise Vorgehen und die Modellversuche erbrachten sehr gute Entscheidungsgrundlagen für die künftigen Investitionen.

Für den Fall einer unerwarteten Turbinenhavarie stehen heute gültige Modellresultate für eine sofortige Umsetzung in die Grossausführung bereits zur Verfügung.

Diese Mehrproduktion ist für eine so alte Anlage wie Klingnau unerwartet tief und somit nicht typisch. Diese Erkenntnis kann für manche optimistische Vorhersage bei anderen Projekten, die dann nach der Modernisierung nicht eingetroffen ist, eine mögliche Erklärung sein.

Die Turbine wurde durch das Büro Straub AG, Rütistrasse 3a, CH-5401 Baden, ausgemessen.

Adressen der Verfasser:
*Leonhard Bächli,* Aarewerke AG, Kraftwerk Klingnau, CH-5322 Koblenz. *Ludwig Becke,* Colenco Power Consulting AG, Mellingerstrasse 207, CH-5405 Baden.

# Geschichte der Dammbruchwelle

*Willi H. Hager und André Chervet*

## Zusammenfassung

*Die Entwicklung der mathematischen Hydraulik hängt wesentlich mit den Basisgleichungen der eindimensionalen Strömung zusammen. Anhand von vier ausgewählten Beiträgen zu instationären Kanalströmungen wird diese faszinierende Entwicklung geschildert und die wohl interessanteste Anwendung, eben die Dammbruchwelle, aufgezeigt. Gleichzeitig wird eine kurze Biographie von fünf ausserordentlichen Hydraulikern vorgestellt.*

## Einleitung

Von allen instationären Flüssigkeitsströmungen stellt die Dammbruchwelle wohl das spektakulärste – gleichzeitig aber das physikalisch am schwierigsten erfassbare – Phänomen dar. In vielen Ländern ist es heute Vorschrift, zu jedem grösseren Wasserbauprojekt auch diesen Katastrophenfall in Erwägung zu ziehen und durch eine Risikoanalyse dessen Auswirkungen auf das Unterwasser zu ermitteln. Die mathematische Basis des Dammbruchproblems wurde vor gut 100 Jahren von *de Saint-Venant* durch die nach ihm benannten Gleichungen geschaffen. Sein geistiger Schüler *Boussinesq* hat das Grundgerüst entwickelt und mit Beobachtungen von *Bazin* verifiziert.

Losgelöst von der französischen Schule schrieb *Ritter* eine erwähnenswerte Publikation, welche jedoch vollständig ausserhalb seines Fachgebiets Baustatik lag. Dank *Forchheimer* ist diese Quelle heute zur Basispublikation des Dammbruchproblems schlechthin geworden, und mit der «Ritterwelle» bezeichnet man eben den von ihm beschriebenen, vereinfachten Bruchvorgang. Die ersten Experimente stammten von *Schoklitsch,* dem Schüler von *Forchheimer,* der dessen Universalwerk später in den Wasserbau übertrug.

Das Ziel dieser Arbeit ist, einerseits die geschichtliche Entwicklung der mathematischen Beschreibung der instationären Strömung nachzuzeichnen und andererseits das Lebensbild von fünf Hydraulikern einer breiteren Öffentlichkeit vorzustellen. Die verwendeten Gleichungsnummern werden für jeden dieser Hydrauliker separat erfasst, und eine Kurzbiographie vermittelt Hintergrundwissen.

## Französische Theoretiker

*De Saint-Venant* (1871) gelang als erstem die Ableitung der eindimensionalen Bewegungsgleichungen von Flüssigkeitsströmungen. Vorerst wies er auf *Lagrange* hin, der für die Ausbreitungsgeschwindigkeit $c$ einer Elementarwelle im Flachwasser den Ausdruck

$$c = (gh)^{1/2} \qquad \text{(V1)}$$

ableitete, mit g als Erdbeschleunigung und $h$ als lokaler Wassertiefe. In einem mit der mittleren Geschwindigkeit $V$ bewegten Fluid wird nach *Scott Russell* (1808–1882) und *Bazin* (1829–1917) sinngemäss

$$c = V \pm (gh)^{1/2}. \qquad \text{(V2)}$$

Vorerst wird die *Kontinuitätsgleichung* abgeleitet, welche durch eine einfache Volumenbetrachtung erhalten wird zu

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{\partial (VF)}{\partial x} = 0. \qquad \text{(V3)}$$

Dabei bedeuten $F$ die Querschnittsfläche, $t$ die Zeit und $x$ die Lagekoordinate.

Als *Impulsgleichung* für kleine Sohlengefälle ergibt sich: Die Gewichtskomponente lautet $(\rho g F dx)\ [d(\xi+h)/dx]\ \Delta t$ mit $\xi$ als Oberflächenlage über einem Referenzniveau, die Druckkomponente ist $[(-\rho g F dx)\ \partial h/\partial x]\ \Delta t$, die Widerstandskomponente wird $(-\rho g W P_h dx)\ \Delta t$ mit $W$ als Einheitswiderstand und $P_h$ als benetztem Umfang und die Inertialkomponente beträgt $(\rho F dx)\ (dV/dt)\ \Delta t = (\rho F dx)\ [\partial V/\partial t + V(\partial V/\partial x)]\ \Delta t$. Durch Gleichsetzen dieser vier Terme entsteht

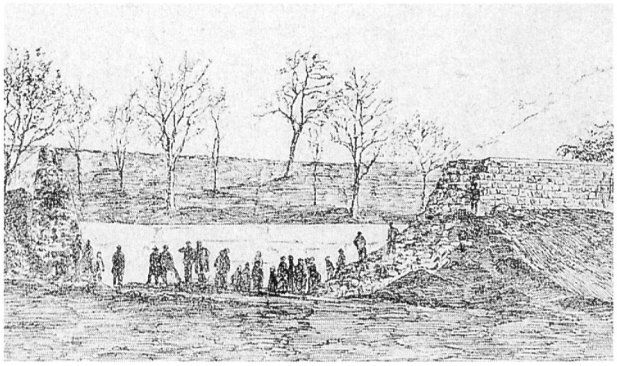

Bild 1. Historischer Dammbruch in Sonzier nahe bei Montreux (L'Ingegneria Civile, Torino 15[1]: 1).