

Zeitschrift: Schweizerische Bauzeitung

Band: 88 (1970)

Heft: 1

Artikel: Das Wasserschloss des Kaunertalkraftwerkes der TIWAG: ein neuer Typ eines rückstromgedrosselten Kammerwasserschlosses

Autor: Seeber, Gerhart

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-84378>

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: 17.11.2024

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

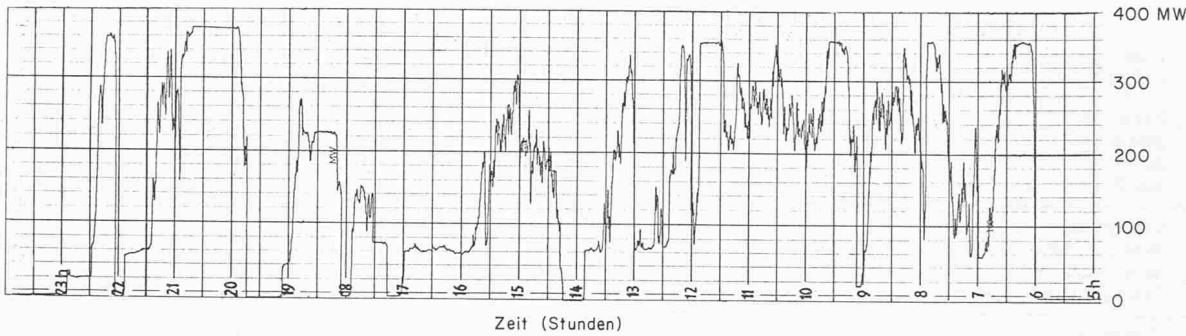
Das Wasserschloss des Kaurertalkraftwerkes der TIWAG

DK 627.843

Ein neuer Typ eines rückstromgedrosselten Kammerwasserschlosses

Von Dr. Ing. G. Seeber, Tiroler Wasserkraftwerke AG (TIWAG), Innsbruck

Belastungsdiagramm



Druckverlauf im Stollen

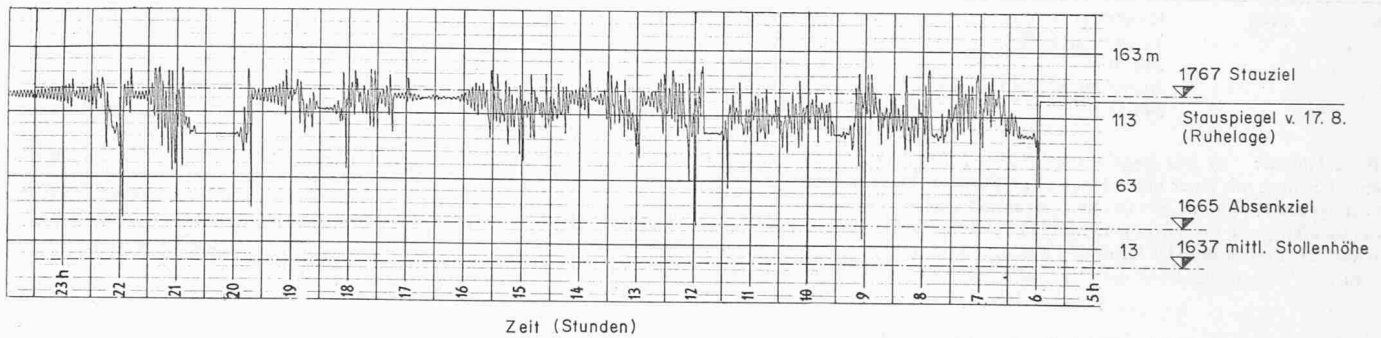


Bild 1. Kaurertalkraftwerk: Verlauf der Leistung und des Druckes im Wasserschloss an einem normalen Werktag (17. 8. 1967; Zeit von rechts nach links)

1. Allgemeines

Die hydraulischen Speicherkraftwerke werden in zunehmendem Ausmass zur Netzregelung verwendet und hiebei über eine Leistungs-Frequenz-Regelung automatisch gesteuert. Dabei treten innerhalb kurzer Zeit, das heisst oft innerhalb weniger Sekunden und Minuten grosse Leistungsschwankungen auf, die ausgeglichen werden müssen. Das in Bild 1 gezeigte Tagesbelastungsdiagramm des Kaurertalkraftwerkes veranschaulicht diese Vorgänge. Bei der automatischen Regelung ist daher damit zu rechnen, dass ein Schaltvorgang (Lastabwurf oder Lastaufnahme) zu einem Zeitpunkt erfolgt, wo die Schwingung im Wasserschloss infolge eines vorhergehenden Schaltvorganges gerade einen ungünstigen Punkt erreicht hat. Soll ein Spitzenkraftwerk unbeschränkt mit seiner vollen Leistung im Regelbetrieb eingesetzt werden können, so muss auch das Wasserschloss für Schaltfälle entworfen werden, die in ungünstigen Zeitpunkten aufeinander folgen.

Wie aus Tabelle 1 hervorgeht, stiegen die Bedingungen für die Bemessung der Wasserschlösser seit Kriegsende stark an. Bezeichnend für diese Entwicklung dürfte das Kraftwerk Cimego [10] sein, das 1956 in Betrieb ging und dessen Unterkammer bereits 1960 um rund 100% vergrössert wurde. Ferner fällt auf, dass fast durchwegs, entsprechend der tatsächlichen Schluckfähigkeit der Turbinen, 110% des Ausbaudurchflusses berücksichtigt sind.

2. Bemessung des Kammervolumens für Mehrfachschaltfälle

Die Frage, um wieviel grösser das Kammervolumen für solche Fälle bemessen werden muss, ist von erheblicher wirtschaftlicher Bedeutung. Sie lässt sich nicht eindeutig beantworten, denn sie hängt von den Anlageverhältnissen ab. Einen Überblick gibt jedoch Bild 2, in welchem für ein idealisiertes Kammerwasserschloss das spezifische Kammervolumen in Abhängigkeit vom Verhältnis der jeweiligen Wassermenge Q zur Vollwassermenge Q_0 aufgetragen ist. Die negativen Werte

bedeuten, dass das Wasser nach dem Aufschwngen im Wasserschloss zum Speicher zurückfliesst. Wird in diesem Zeitpunkt wieder volle Last aufgenommen, so benötigt man nach Bild 2 ein mehrfaches Unterkammervolumen. Bei schlechter Dämpfung ist die rückschwingende Wassermenge Q oft nicht viel kleiner als Q_0 , so dass die Unterkammer etwa viermal grösser werden müsste als beim Anfahren aus dem Stillstand.

Ähnlich, jedoch nicht so krass, liegen die Verhältnisse bei der Oberkammer. Hier ist das Kammervolumen abhängig von Q^2 . Wird daher durch eine vorhergehende Schwingung infolge Lastaufnahme

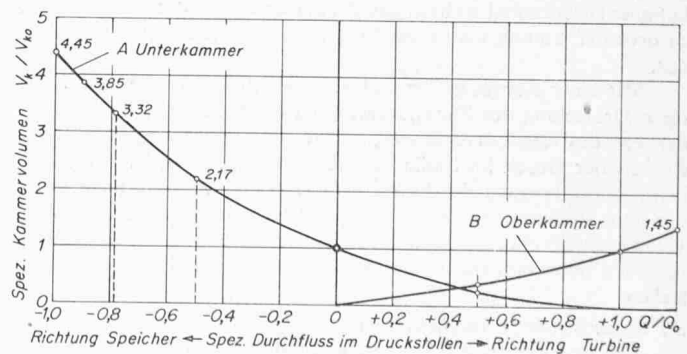


Bild 2. Vergrösserung des Kammervolumens bei einem idealisierten Kammerwasserschloss:

- A. Vergrösserung des Unterkammervolumens infolge Zuschalten aus Rückschwingung
- B. Vergrösserung des Oberkammervolumens infolge Abschalten aus Vorschwingung

Tabelle 1. Der Bemessung von Wasserschlossern neuerer Speicherkraftwerke zugrunde gelegte Schaltfälle

Lfd. Nr.	Inbetriebnahme	Kraftwerkanlage, max. Leistung	Wasserschlosssystem	Schaltfälle für die Bemessung	
				der Oberkammer	der Unterkammer
1	1944	Kaprun Hauptstufe 220 MW [4]	2 Kammern mit Schrägschacht; Überfallmauer in Oberkammer	100% 51 s - 0% a)	50% - 51 s - 110% b)
2	1956	Riddes (Mauvoisin) 5 × 45 = 225 MW	2 Kammern mit Schrägschacht	I 5 × 110% - 30 s - 0% II 1 × 110% } - 30 s - 5 × 110% 4 × L } 5 × 110% - 30 s - 0% *) d)	I 4 × L c) - 30 s - 4 × 110% II 1 × 110% } - 30 s - 5 × 110% 4 × L } III 5 × 110% - 30 s - 2 × 0 + 3 × L 3 × L - 30 s - 3 × 110% *)
3	1958	Lünersee e) 225 MW	2 Kammern mit Schrägschacht	0% - 40 s - 100% 100% - 40 s - 0% *)	0 - 40 s - 100%
4	1960	Ferrera 185 MW	2 Kammern mit vertikalem Schacht ohne Drosselung	100% - 20 bis 40 s - 0%	100% - 20 bis 40 s - L (5-10%) L - 20 bis 40 s - 100% *)
5		Bärenburg 225 MW			
6		Sils 235 MW f)			
7	1956	Cimego vor Wasserschlossvergrößerung 214 MW [10]	2 Kammern mit Schrägschacht	50% - 14 s - 100% 100% - 40 s - 0% *)	100% - 40 s - 0% 0% - 14 s - 50% *)
	1960	Cimego nach Wasserschlossvergrößerung	zusätzliche Unterkammer obertätig	0% - 14 s - 110% 110% - 40 s - 0% *)	110% - 40 s - 0% 0% - 14 s - 110% *)
8	1964	Kaunertal Vorentwurf(1958) 340 MW Ausführung(1960) 390 MW	2 Kammern mit Schrägschacht 2 Kammern mit Rückstromdrossel und Schrägschacht	110% - 30 s - 0% 0% - 45 s - 110% 110% - 45 s - 0% *)	0% - 30 s - 110% 110% - 45 s - L L - 45 s - 100% *) g)

Bemerkungen: a) Die Angabe 100% - 51 s - 0% bedeutet eine Abschaltung von der Ausbauleistung in 51 Sekunden auf Nulleistung. b) 110% bedeutet eine Leistung mit einer Überöffnung der Turbine (Düse) um 10%. c) L = Leerlauf. d) Die mit *) bezeichneten Schaltvorgänge sind solche, die den vorangehenden (die in den darüber liegenden Zeilen angegeben sind) im ungünstigsten Augenblick nachfolgenden. e) Beim Lünersee wurde die Schluckfähigkeit der Turbinen von 117% nicht berücksichtigt. Bei tiefem Seespiegel ist die Freiheit der Betriebsführung beschränkt. f) Die drei Werke bilden die drei Stufen der Kraftwerke Hinterrhein. Die Angaben über die Schaltfälle gelten für jede der drei Stufen. g) Bei einem Speicherspiegel von 3 m über Absenziel kann die Düsenöffnung wieder 110% betragen (Schaltfall II b).

der Durchfluss im Stollen um rund 20% grösser als Q_0 , so muss die Oberkammer um rund 40% grösser werden. Dieser Wert bleibt weit unter dem der Unterkammer. Nicht berücksichtigt ist dabei eine Teilfüllung des Wasserschlosses durch eine vorhergehende Schwingung.

3. Möglichkeiten für eine Verminderung des Kammervolumens bei Mehrfachschaltfällen

Unter 2. wurde gezeigt, inwieweit sich das Kammervolumen bei Mehrfachschaltfällen vergrössert. Die starke Vergrößerung der Unterkammer ergibt sich daraus, dass die Wassermenge im Stollen, die infolge einer vorhergehenden Schwingung im Wasserschloss in Richtung Speicher fliesst, zuerst gebremst und anschliessend in Richtung Turbine beschleunigt werden muss. Hierfür ist verständlicherweise mehr Energie nötig, als für die Beschleunigung aus dem Stillstand. Wenn es aber gelingt, die Schwingung abzufangen, das heisst das Wasser in der Oberkammer zurückzuhalten bzw. das Zurückschwingen des Wassers stark zu drosseln, kommt man ohne Vergrößerung des Kammervolumens aus.

Mit einer normalen Drossel am Eintritt ins Wasserschloss ist diese Drosselung des Zurückschwingens nicht möglich, sie wäre für den Fall des Abschaltvorganges, also für das Aufschwingen zu stark, so dass der Druck im Stollen zu hoch ansteigen würde. Auch darf beim Anfahrvorgang der Druck infolge der Drosselung nicht unter den dem Stollenniveau entsprechenden Druck absinken. Das gesamte Unterkammervolumen muss trotz der Drosselung der Oberkammer bzw. des Schachtes mehr oder weniger ungedrosselt zur Verfügung stehen.

3.1 Bisher bekannte Möglichkeiten

Um eine derartige Schwingungsdämpfung zu erreichen, wurden bereits einige Ausführungsformen entwickelt, wie sie in Bild 3 schematisch dargestellt sind:

a) Bei «niederen» Wasserschlossern (geringe Schwankung des Oberwasserspiegels) ergibt das Differentialwasserschloss nach R. D. Johnson, Bild 3a, eine gute Dämpfung und ist auch wirtschaftlich. Im kleinen Steigschacht erreicht der Wasserspiegel ohne Drosselung rasch

die Extremwerte, während das Zurückfliessen aus dem Hauptschacht so gedrosselt werden kann, dass der Spiegel im Steigschacht, der hier mit der Drucklinie identisch ist, über dem Stollenniveau bleibt.

b) Eine Kombination mit einem Kammerwasserschloss stellt das Beispiel des Kraftwerkes Imst der TIWAG [6] dar, Bild 3b.

c) Bei «hohen» Wasserschlossern (grosse Speicherschwankung) ist das Kammerwasserschloss nach Bild 3c gebräuchlicher. Eine bessere Dämpfung lässt sich erreichen, wenn der Eintritt in die Oberkammer mit einer Überfallmauer gesperrt wird. Der höchste Wasserspiegel wird zwar nicht so schnell erreicht wie beim Johnson-Wasserschloss, weil der Schacht den gesamten, für die Stabilität erforderlichen Querschnitt aufweisen muss (beim Johnson-Wasserschloss wirken Steigrohr und Hauptschacht stabilitätsmässig zusammen), doch wird auch hier die aufschwingende Wassermenge hinter der Überfallmauer zurückgehalten und über Drosselöffnungen in dieser Mauer (die auch Klappen haben können) langsam wieder abgegeben. Dadurch lässt sich das Zurückschwingen stark dämpfen. Bei Kraftwerken mit grosser Spiegelschwankung im Speicher und grossem Stabilitätsquerschnitt (langer Stollen, grosser Durchmesser bei geringer Fallhöhe) ergibt sich aber ein grosses Schachtvolumen, so dass das allein im Schacht befindliche Wasser wieder eine starke Gegenschwingung erzeugt.

Schacht- wie Kammerwasserschlosser werden vielfach mit einer möglichst unsymmetrischen Drossel ausgerüstet, um eine bessere Dämpfung zu erzielen. Die erreichbare Asymmetrie dieser Drosseln ist aber verhältnismässig gering. Der jeweilige Drosselwert darf nur so gross sein, dass der freie Wasserspiegel und die Drucklinie in beiden Richtungen die zulässigen Extremwerte nicht überschreiten.

3.2 Neue Möglichkeiten zur besseren Dämpfung der Schwingung

Beim Differentialwasserschloss könnte noch eine wesentliche Verbesserung der Dämpfung erreicht werden, wenn, wie in Bild 3d dargestellt, eine über den Steigschacht belüftete Unterkammer angeordnet würde. Die Drossel, die das Wasser im Hauptschacht zurückhält, liesse sich dann wesentlich «schärfer» bemessen, da bei Lastaufnahmen das Wasser ungedrosselt der Unterkammer entnommen werden könnte.

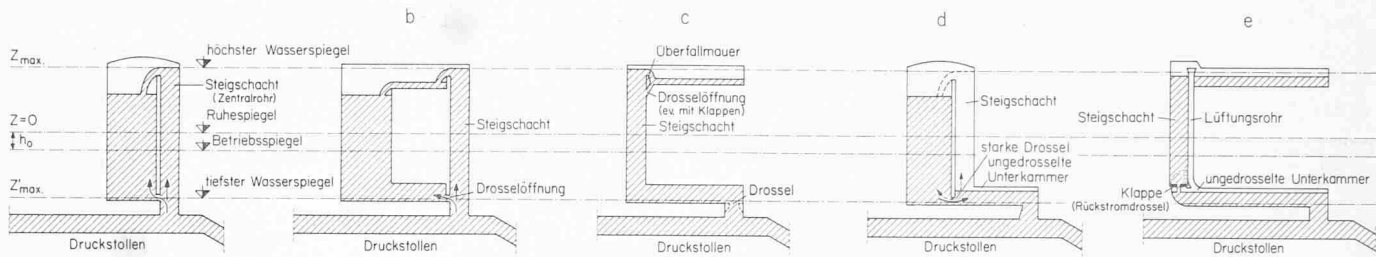


Bild 3a. Differentialwasserschloss nach Johnson

Bild 3b. Differentialwasserschloss mit Kammern (Kraftwerk Imst)

Bild 3c. Gedrosseltes Kammerwasserschloss mit Überfallmauer in der Oberkammer

Bild 3d. Verbessertes Differentialwasserschloss mit über Steigschacht belüfteter Unterkammer und starker Drosselung des Hauptschachtes (neue Variante von a und b)

Bild 3e. Kammerwasserschloss mit belüfteter Unterkammer und einseitiger Drosselung des Schachtes durch Klappe oder Rückstromdrossel (Kauertalkraftwerk der TIWAG)

Bild 3. Ausführungsformen gedrosselter Wasserschlösser

Bei «hohen Wasserschlossern» ist vom gedrosselten Kammerwasserschloss nach Bild 3c auszugehen. Zweckmässigerweise soll auch die Unterkammer durchströmt sein. Es geht nun darum, nicht nur den Ausfluss aus der Oberkammer, sondern auch den Ausfluss aus dem Schacht so stark zu drosseln, dass keine grössere Gegenschwingung mehr entsteht. Dabei darf aber das Ausströmen aus der Unterkammer nicht zu stark gedrosselt werden. Um diese Wirkung zu erzielen, legen wir gemäss Bild 3e eine extrem einseitige Drossel (Klappe) an das untere Ende des Schachtes und belüften die Unterkammer über eine eigene Leitung. Mit dieser Anordnung wurden für das Wasserschloss des Kauertalkraftwerkes Proberechnungen durchgeführt, um die nötigen Widerstandsbeiwerte der Drossel zu ermitteln.

Aus der Bedingung, dass beim Aufschwingen die Drucklinie nicht wesentlich über den Schwallenspiegel ansteigen soll, ergab sich der Widerstandsbeiwert in Hauptstromrichtung $\zeta_{HR} = 10$. Der Beiwert wird dabei auf die Geschwindigkeitshöhe im Steigschacht bezogen, entsprechend der Gleichung $h_v = \zeta v^2 / 2g$.

Beim Rückschwingen muss der Widerstandsbeiwert ζ_{RR} dann rund 400 betragen, damit die Schwingung abgefangen wird. Das Wasser, das beim Abstellen der Maschinen in die Oberkammer aufschwingt, wird zurückgehalten und so langsam abgegeben, dass die rückläufige Geschwindigkeit im Druckstollen nur sehr klein ist, doch so schnell, dass für das nächste mögliche Aufschwingen wieder genügend Raum in der Oberkammer frei wird.

Beim normalen Zuschalten aus dem Stillstand steht trotzdem das gesamte Unterkammervolumen ungedrosselt zur Verfügung, weil die Unterkammer eigens belüftet ist.

Beim Zuschalten aus einer Schwingung werden die Verhältnisse nicht schlechter, da die kinetische Energie des zu beschleunigenden Stollenwassers infolge der geringen Fliessgeschwindigkeit in Gegenrichtung nicht viel grösser ist als bei Zuschalten aus dem Stillstand; dagegen wirkt das gesamte, in der Oberkammer und im Schacht aus der vorgängigen Schwingung zurückgehaltene Wasser, das nun während der Lastaufnahme durch die Drossel hindurch in die Unterkammer nachströmt, wie ein Teil des Wassers der Unterkammer und vermehrt so das Volumen der Unterkammer.

Ähnlich günstig zeigten sich auch die Verhältnisse bei der Berechnung der Oberkammer: Infolge der ungedrosselten Unterkammer wurde die Stollenwassermenge beim Anfahren nur rund 10% grösser als Q_0 , und beim darauffolgenden Abschalten machte sich die Drosselung des Schachtes in vorteilhaftem Sinne bemerkbar, so dass sich auch hier für den Doppelschaltfall kein grösseres Kammervolumen als nötig erwies.

Damit war gezeigt, dass bei einer derart asymmetrischen Drosselung die Schwingungen abgefangen und mit dem für den einfachen Schaltfall berechneten Kammervolumen auch die Mehrfachschaltfälle beherrscht werden können. Dabei ist es offensichtlich belanglos, wieviel Schaltvorgänge aufeinander folgen, da auf einen Lastabwurf immer eine Lastaufnahme folgen muss, um wieder Last abwerfen zu können und umgekehrt.

Es war nun noch die Frage zu klären, wie eine so stark unsymmetrische Drosselung erreicht werden kann. Naheliegender wäre der Einbau einer Klappe, doch ist ein bewegliches Organ, das unter Wasser nicht gewartet und dann unter Umständen ganz versagen kann, für diese heikle Funktion nicht erwünscht. Andere, so stark unsymmetrische Drosseln wurden unseres Wissens bisher noch in keinem Wasserschloss eingebaut. Auf Anregung von Dr. Ing. H. Lauffer, Vorstands-

direktor der TIWAG, wurde darauf die Anwendbarkeit der Rückstromdrossel nach Prof. D. Thoma untersucht, für die 1929 von R. Heim [2] und 1934 von R. Zobel [11] am Hydraulischen Institut der Technischen Hochschule München Modellversuche durchgeführt und veröffentlicht wurden. Prof. Thoma wollte mit dieser Drossel das Ausfliessen von Wasserbehältern bei Rohrbruch verhindern, praktische Anwendungen sind jedoch nicht bekannt geworden.

Bild 4 zeigt schematisch eine solche Drossel. Sie hat die Form einer leeren Turbinenspirale mit Saugrohr, besitzt keine beweglichen Teile und kann daher nie versagen. In Hauptstromrichtung (HR) wird der Wasserstrom nur um 90° umgelenkt, wobei er wenig Widerstand findet. In Rückstromrichtung (RR) dagegen erzeugt das tangential in die Spirale einströmende Wasser eine Drallströmung, die infolge der dabei auftretenden Fliehkraft das Wasser hindert, durch das zentrale Saugrohr abzufließen. Diese Drossel hat sich im Betrieb bestens bewährt.

4. Das Wasserschloss des Kauertalkraftwerkes

Eine Übersicht über die gesamte Anordnung des Wasserschlosses gibt Bild 5.

4.1 Technische Daten des Kauertalkraftwerkes

Speicher:	Stauziel	1767 m ü. M.
	Absenziel	1665 m ü. M.
	Spiegelschwankung	102 m
	Inhalt	140 Mio m ³
Druckstollen:	Länge	13,2 km
	Durchmesser	4,0 m
Höhe Turbinenachse		871 m ü. M.
Bruttofallhöhe		794–896 m
Triebwassermenge bei 100% Düsenöffnung		46–49 m ³ /s
bei 110% Düsenöffnung		51–54 m ³ /s
Druckverlust im Druckstollen (110%)		28–31 m
Werkleistung (110%)		350–390 MW

4.2 Bemessung des Wasserschlosses

Das Wasserschloss war ursprünglich als Kammerwasserschloss mit durchströmter Unterkammer und Überfallmauer in der Oberkammer geplant. Entsprechend den damaligen Erkenntnissen war es für den einfachen Schaltfall des Zu- und Abschaltens der vollen Leistung, jedoch schon mit 110% Düsenöffnung innerhalb der Düsenverschluss- bzw. Öffnungszeit von 30 s bemessen (siehe Tabelle 1). Erst nach Baubeginn im Jahre 1960 stellte sich die Notwendigkeit heraus,

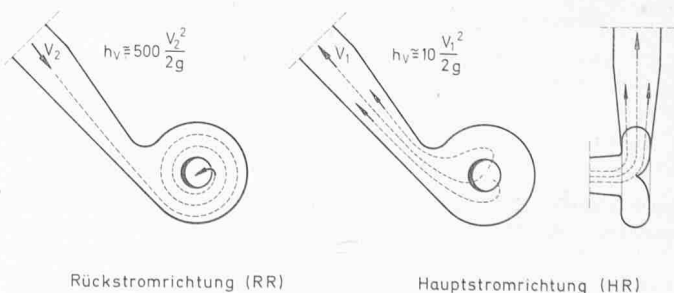


Bild 4. Strömungsverhältnisse in der Rückstromdrossel

symmetrischen Drosselung eine bessere Dämpfung zu erreichen und kamen dabei auf die unter 3.2 beschriebene Lösung der Rückstromdrosselung. Mit dieser gelang es, mit dem vorhandenen Kammer- und Stollenvolumen das Auslangen zu finden.

Folgende Schaltfälle wurden der Berechnung zugrunde gelegt:

Schaltfall I, Stauziel 1767 m

Zuschalten aller 5 Maschinensätze von 0% auf 110% Leistung in 45 s. Abschalten aller 5 Maschinensätze in 45 s von 110% Leistung auf 0% und zwar im ungünstigsten Augenblick der Wasserschlossschwingung, das heisst in dem Zeitpunkt, in welchem die zum Wasserschloss strömende Stollenwassermenge ihr Maximum erreicht.

Schaltfall IIa, Absenkziel 1665 m

Abschalten aller 5 Maschinensätze von 110% Leistung auf Leerlauf (1,5 m³/s) in 45 s; Zuschalten aller 5 Maschinensätze auf 100%¹⁾ Leistung in 45 s und zwar im ungünstigsten Augenblick, das heisst wenn die zum Speicher zurückströmende Stollenwassermenge ihr Maximum erreicht.

Schaltfall IIb, Absenkziel 1668 m

Abschalten aller 5 Maschinensätze von 110% Leistung auf Leerlauf in 45 s; Zuschalten aller 5 Maschinensätze auf 110% Leistung in 45 s und zwar im ungünstigsten Augenblick, das heisst wenn die zum Speicher zurückströmende Stollenwassermenge ihr Maximum erreicht.

Schaltfall III, Speicherspiegel 1733 m

Abschalten aller 5 Maschinensätze von 110% Leistung auf Leerlauf in 45 s; Zuschalten aller 5 Maschinensätze von 110% Leistung in 45 s im ungünstigsten Augenblick. Nochmaliges Abschalten aller 5 Maschinensätze auf 0%, wiederum im ungünstigsten Augenblick.

Die Berechnung ergab ein Oberkammervolumen von nur rund 4400 m³, so dass gegenüber dem bereits ausgebrochenen Volumen sogar ein Überschuss von 600 m³ verblieb. Die Unterkammer reichte bei Absenkziel 1665 m zwar nicht ganz aus für das Zuschalten von 110% Vollast nach einer 110% Volllastabschaltung, wohl aber für eine Zuschaltung von 100% Vollast, was aber bei diesem tiefen Spiegel vollkommen ausreicht. Bei einem etwa 3 m höher liegenden Stauspiegel können dann schon wieder 110% Vollast zugeschaltet werden. Schaltfall III diente zur Untersuchung des raschen Druckanstieges, welcher entsteht, wenn die Unterkammer nach einer Teilentleerung infolge eines Lastabwurfes wieder rasch gefüllt wird.

4.3 Die Rückstromdrossel

Die Verwendung einer Rückstromdrossel nach Prof. Thoma in einem Wasserschloss war unseres Wissens vollkommen neu und ohne Beispiel. Es bedurfte daher eingehender und sorgfältiger Untersuchungen, ob sich diese Drossel in der Grossausführung überhaupt verwirklichen liess. Der Energieumsatz in der Drossel beträgt in unserem Falle bei maximal rund 10 m³/s Durchfluss in Rückstromrichtung immerhin bis über 15000 PS.

Ausgangspunkt für unsere Untersuchungen waren die Modellversuche von R. Heim [2] und R. Zobel [11]. Hier zeigte sich schon, dass mit einer derartigen Drossel die geforderten Widerstandswerte erreicht werden können. Die eben genannten Modellversuche erfassten allerdings nur einen Reynolds-Bereich von 50000 bis 250000, über welchen die Widerstandsbeiwerte sich stark änderten. Es war jedoch zu vermuten, dass ab einer bestimmten Reynolds-Zahl die ζ -Werte konstant würden. Diese Werte galt es zunächst zu finden.

Ferner war die kleinste Drosselgrösse, das heisst das Verhältnis von Einlauf- zu Spiraldurchmesser zu suchen. (Das beste, von Zobel untersuchte Modell IV hätte, auf die Verhältnisse des Kaunertalkraftwerkes umgerechnet, einen Spiraldurchmesser von rund 14 m ergeben. Die kleineren Modelle hatten einen zu grossen Widerstand in Hauptstromrichtung.) Dazu waren Modellversuche in grösserem Massstab notwendig.

4.31 Die Modellversuche

4.311 Modellversuche der TIWAG

Im Wasserschloss des Kaunertalkraftwerkes werden Reynolds-Zahlen bis über 10⁷ erreicht. Um vergleichbare Werte zu erhalten, war bei einem Modellmassstab von 1:20 ein Wasserdruck von rund 400 m WS erforderlich. Da eine solche Druckhöhe bei entsprechender Wassermenge in den in Betracht kommenden Versuchsanstalten nicht verfügbar war, wurden die Versuche im Achenseekraftwerk der TIWAG in eigener Regie durchgeführt. Neben dem nötigen Druckwasser stand hier auch eine gute mechanische Werkstätte zur Verfügung.

¹⁾ Zuschalten auf 110% Leistung nach einer Vollast-Abschaltung ist erst ab der Stauhöhe 1668 möglich (Schaltfall IIb).

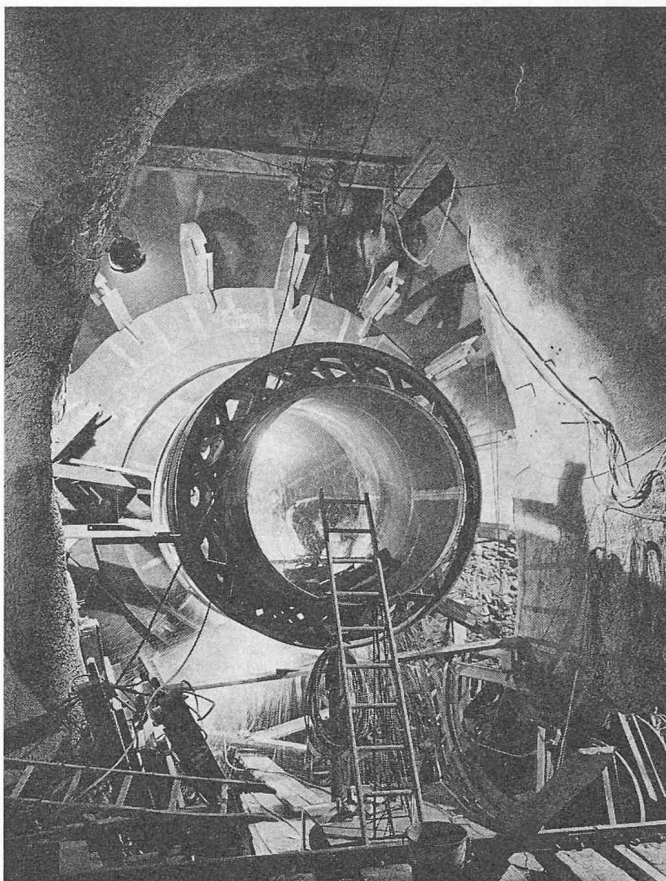


Bild 7. Montage der Rückstromdrossel im Kaunertalkraftwerk

Die Versuche brachten, kurz zusammengefasst, folgendes Ergebnis:

- Der laut Vorberechnung geforderte Widerstandswert für die Hauptstromrichtung $\zeta_{HR} = 10$ lässt sich leicht verwirklichen, wobei
- der zugehörige Wert für die Rückstromrichtung ζ_{RR} eine Grösse von 350–550 erreicht und abhängig ist von der Belüftung (oberer Wert mit Belüftung).
- Die bei R. Zobel [11] im Saugrohr eingebauten Gleichrichter werden bei dieser hohen Beanspruchung sofort zerstört, auch bei stärkster mechanischer Ausbildung. Die Drallströmung muss deshalb langsam in der Unterkammer gleichgerichtet werden. Die Unterkammer wird deshalb im rechten Winkel angeschlossen und erhält lange, massive Gleichrichteschwellen.
- Kavitation lässt sich nicht ganz vermeiden, tritt aber nur so lange auf, als die Rückstromdrossel nicht belüftet wird, das heisst solange in den Belüftungsrohren noch Wasser ist (etwa 10 bis 20 s). Am wirksamsten ist die Belüftung von «unten», das heisst über das Belüftungsrohr der Unterkammer (verlängerte Unterkammer).
- Der Spiraldurchmesser kann, ohne das geforderte Widerstandsverhältnis stärker zu beeinflussen, bis auf etwa doppelten Zulaufdurchmesser (= Schachtdurchmesser) verkleinert werden.

4.312 Modellversuche der Technischen Hochschule Graz

Am Institut für konstruktiven Wasserbau der Technischen Hochschule Graz (Prof. Dr. H. Grengg) wurde noch ein Teilmodell des Wasserschlosses untersucht, das die Rückstromdrossel mit der gesamten Unterkammer und den Einlauf in den Druckstollen darstellte. Es sollte hier geprüft werden, ob bei gewissen Betriebszuständen die Gefahr eines Luftenzuges in den Druckstollen besteht und ob in der Längsrichtung ungünstige Spiegelschwankungen in der 280 m langen Unterkammer vorkommen können. Es konnten jedoch keine nachteiligen Zustände festgestellt werden.

Weiter wurde auch der rasche Druckanstieg im Schaltfall III (Wiederfüllen der Unterkammer) untersucht. Infolge des sich bildenden Wasser-Luft-Gemisches wurde der Druckanstieg stark gedämpft.

Nach den ersten Schaltversuchen im Kraftwerk wurde schliesslich noch behelfsmässig versucht, modellmässig die in der Natur beobachtete «Anlaufzeit» der Drossel zu bestimmen, was wegen der

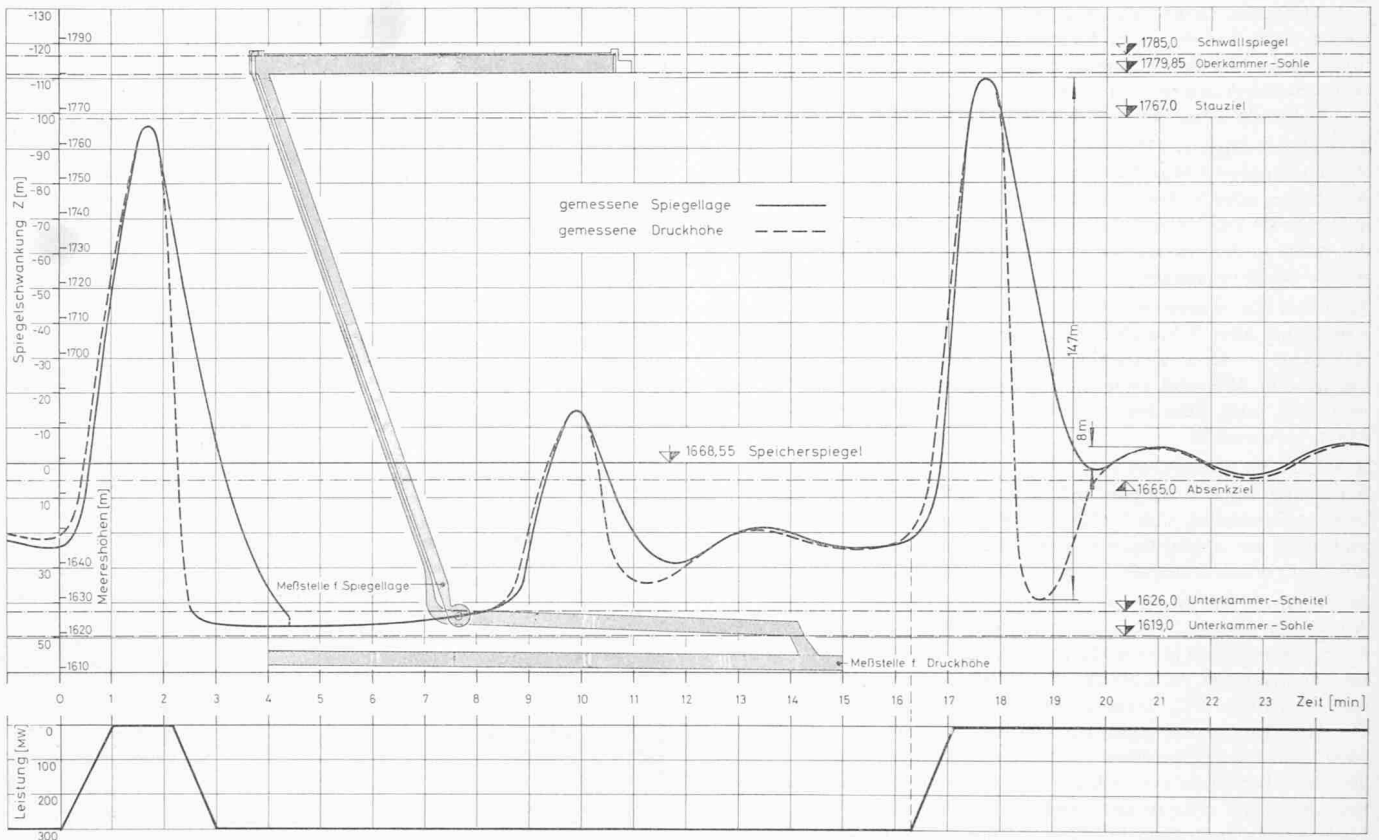


Bild 8. Schwingungsverlauf bei Schaltversuch am 26. April 1965: Abschalten von 300 MW, Zuschalten von 300 MW im ungünstigsten Augenblick und anschliessend neuerliches Abschalten

sehr rasch wechselnden und schwer erfassbaren dynamischen Vorgänge kein brauchbares Ergebnis brachte.

4.32 Anordnung und konstruktive Ausbildung der Rückstromdrossel

Die Rückstromdrossel war also am unteren Ende des Schrägschachtes anzuordnen, doch gab es dafür mehrere Möglichkeiten. Hinsichtlich der nicht leichten Montage der Stahlkonstruktion schien die Lage mit horizontalem Saugrohr am günstigsten. Die Schachtschneise musste dazu um 9 m gegen die Unterkammerachse versetzt werden. In Bild 6 ist deutlich zu sehen, dass die Unterkammer mit einem konischen Krümmer in das Lüftungsrohr übergeht. Dies war notwendig, damit nicht im Augenblick des Vollwerdens der Unterkammer (Schaltfall III), wenn noch Wasser aus dem Schrägschacht in die Unterkammer nachfließt, der Druck plötzlich ansteigt und sich ein Druckstoss ausbildet. Das Belüftungsrohr, das immerhin einen Durchmesser von 800 mm aufweist, wird im First des Schrägschachtes bis in die Schwallkammer hochgeführt, wo es in einem Firstdom trichterförmig ausmündet. Zur Belüftung des Kavitationskernes zweigt die «Nabenbelüftung» mit einem Durchmesser von 250 mm aus dem Lüftungsrohr ab und wird durch den Spiralenboden eingeleitet. Um nun die durch die beiden Belüftungen in die Unterkammer mitgerissene Luft wieder abzuführen, musste eine dritte Rohrleitung, die Unterkammerentlüftung (Durchmesser 500 mm) angeordnet werden.

Die Rückstromdrossel selbst wie auch die anschliessenden Bereiche der Unterkammer und des Schrägschachtes wurden mit einer dickwandigen Panzerung versehen. Schon die Versuchsmodelle wurden so ausgebildet, dass sich die Drossel in der Grossausführung als Stahlkonstruktion einfach bauen liess und sowohl die Innen- wie die Aussendruckbeanspruchung gut aufnehmen konnte.

Die Bemessung auf den Innendruck von rund 18 atü war noch verhältnismässig einfach, da die Rotationskörper grösstenteils nach der Membrantheorie berechnet werden konnten. Die Gebirgsmitwirkung wurde dadurch berücksichtigt, dass als zulässige Spannung die Streckgrenze angenommen wurde. Massgebend war aber die Bemessung auf Aussendruck, da in diesem Bereich des Wasserschlosses Bergwasser mit einem Druck von rund 10 atü zu erwarten war.

Um gleichzeitig auch der Beanspruchung durch die starken Vibrationen aus dem Betrieb zu begegnen, wurden die Versteifungen zur Aussendruckaufnahme so ausgebildet, dass sich die Stahlkon-

struktion fest im Beton verankerte und ein möglichst grosser Betonkörper zur Mitwirkung kam. Die Versteifungsringe wurden daher als Fachwerkträger gebaut, die sich gut im Hinterfüllbeton verankerten. Ausserdem wurde die Kontaktfuge zum Fels noch durch Hochdruck-Spaltinjektionen nach dem TIWAG-System mit Zementmilch verpresst. Die Hauptabmessungen (Bilder 5 und 6) sind:

Innendurchmesser der Spirale	6,4 m
Aussendurchmesser der Spirale mit Verstärkungen	8,4 m
Wanddicke der Blechhaut	15/20 mm
Gewicht der Rückstromdrossel allein	rund 73 t
Gewicht der gesamten Panzerungen im Bereich der Rückstromdrossel	rund 170 t

Einen Eindruck von der Grösse der Drossel vermittelt Bild 7.

4.4 Die Berechnung des Wasserschlosses

Es leuchtet ein, dass ein derart kompliziertes Wasserschloss nicht nach geschlossenen Formeln wie zum Beispiel ein Schachtwasserschloss berechnet werden kann. Hier muss der Schwingungsvorgang mit allen seinen Randbedingungen numerisch integriert werden. Es soll aber nicht unerwähnt bleiben, dass mit der Formel für das idealisierte Kammer-Wasserschloss die Volumina der Kammern recht gut geschätzt werden können.

Die Berechnung führten wir zuerst nach der Methode von L. Mühlhofer [7] halb analytisch, halb graphisch durch. Später gingen wir zur rein analytischen Methode über, indem der graphische Schritt analytisch ausgeführt wurde; dies war genauer. Die Berücksichtigung der Drosselwirkung in der Berechnung war an und für sich nicht schwierig, da wir für jede Richtung ein konstantes Drosselgesetz annahmen. Die niedrigen Drosselwerte bei den kleinen Re -Zahlen, die in wenigen Sekunden durchlaufen werden, schienen uns vernachlässigbar; diese Vereinfachung erwies sich später allerdings als nicht ganz zulässig.

Von Wichtigkeit war die Berücksichtigung des Lüftungsrohres. Durch dieses fließen im kritischen Zustand rund $10 \text{ m}^3/\text{s}$ Wasser oder rund $35 \text{ m}^3/\text{s}$ Luft. Für die Bewältigung dieser Aufgabe musste das Rohr einen relativ grossen Durchmesser von 0,80 m erhalten; damit war es aber praktisch ein zweiter Schacht und zwar im Nebenschluss zur Drossel, wodurch eine günstige Differentialwirkung entstand.

Infolge der grossen Geschwindigkeiten bzw. Beschleunigungen, die nun das Wasser im Wasserschloss, im besondern im Lüftungsrohr,

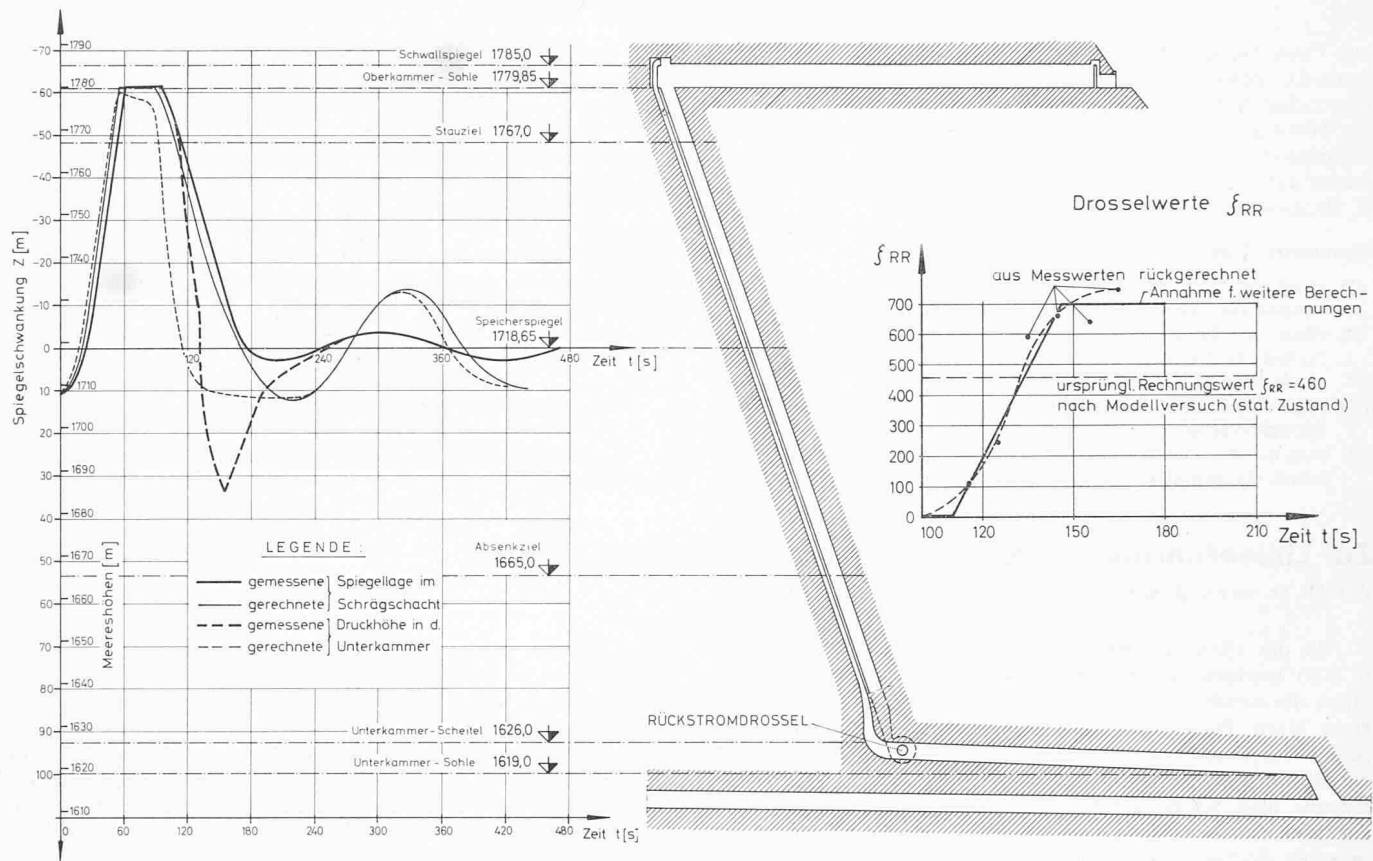


Bild 9. Schwingungsverlauf bei Schaltversuch am 8. Oktober 1964: Abschalten von 223 MW. Vergleich von Berechnung mit Messung und Rückrechnung der tatsächlichen Drosselwerte

erfahren, war es notwendig, sowohl dessen Reibungskräfte als auch dessen Trägheitskräfte in die Rechnung einzubeziehen. Schliesslich musste noch die Anlaufzeit der Drossel, wie auch das im unteren Bereich der langen Oberkammer langsame Abfließen des Wassers funktionsmässig in die Berechnung eingebaut werden.

Da viele Werte in den Integrationsritten durch Iteration gefunden werden mussten, wobei auch viele Randbedingungen gleichzeitig zu erfüllen waren, nahm die Rechnung einen ziemlich grossen Umfang an. Es lag daher nahe, sie für eine elektronische Rechenmaschine zu programmieren. Heute besitzen wir ein Programm sowohl für die «Zuse Z 23» als auch für die «IBM 1130». Da aber die Umstellung des Wasserschlosses auf das rückstromgedrosselte System erst während des Baues erfolgte, liess sich die Programmierung nicht mehr rechtzeitig abschliessen. So musste alles von Hand gerechnet werden.

4.5 Überprüfung des Wasserschlosses durch Schaltversuche

Nach Betriebsaufnahme des Kaunertalkraftwerkes im Oktober 1964 wurden mit den drei damals zur Verfügung stehenden Maschinen (220 MW, d. i. rund 60% der Gesamtleistung) bei dem vorhandenen Stauspiegel 1720 m Mehrfachschaltversuche ausgeführt. Diese Versuche stellten zwar noch keine Überprüfung der Extremwerte dar, zeigten jedoch bereits die erstaunliche Wirksamkeit der Rückstromdrossel: Nach einer Primärschwingung infolge Abschalten-Zuschalten-Abschalten von 220 MW im jeweils ungünstigsten Augenblick, mit einem Aufschwingen von 100 m waren die Folgeschwingungen ab sofort auf Amplituden von kaum ± 5 m begrenzt. Dasselbe Ergebnis zeigten die Schaltversuche vom April 1965 mit 300 MW und einer Stauhöhe nahe dem Absenkziel, sowie die vom Juni 1965 mit 350 MW bei Stauspiegel 1720 m. Besonders die Versuche mit 300 MW, die beim Absenkziel ausgeführt wurden, zeigten gemäss Bild 8 sehr eindrucksvoll die Drosselwirkung: Nach einem insgesamt rund 145 m hohen Aufschwingen war bereits die nächste Welle nicht einmal mehr ± 4 m hoch.

Der Abschaltversuch mit 220 und 300 MW wurde dann gemäss Bild 9 zur Überprüfung des tatsächlichen Drosselgesetzes verwendet, weil bei dieser Schwingung das Wasser gerade nur den Schacht auffüllte und daher die durch die Drossel strömende Wassermenge genau aus der Spiegelabsenkung im Schacht berechnet werden konnte. Dabei zeigte sich, wie schon erwähnt, dass der Schwingungsverlauf durch die Anlaufzeit der Drossel (Aufbau der Drallströmung) stark beein-

flusst wird, dass dieser Aufbau nicht mehr zu vernachlässigen war. Die Beeinflussung war allerdings, wie Bild 9 zeigt, sehr günstig: Infolge der Trägheit der Drossel wies die Folgeschwingung statt rechnermässig ± 15 m, nur mehr eine Amplitude von ± 5 m auf. Nachdem eine entsprechende Funktion für den zeitlichen Verlauf der Drosselwerte in die Rechnung eingeführt wurde, stimmten die Rechnungswerte mit den gemessenen sehr gut überein.

Auf Grund dieses günstigen Versuchsergebnisses wurde die Überprüfung des Wasserschlosses abgeschlossen, denn die extremen Schaltbedingungen stellen auch für die mechanische Beanspruchung des Wasserschlosses und des Druckstollens extreme Bedingungen dar, die man nicht unnötig oft herbeiführen will.

5. Erfahrungen

Nach mehr als vierjährigem Betrieb lässt sich heute feststellen:

- Für den Lastverteiler eines grossen Netzes ist es von grosser Wichtigkeit, grosse Spitzenkraftwerke zur Verfügung zu haben, deren volle Leistung ohne jede Einschränkung automatisch ferngesteuert zur Leistungs-Frequenzregelung eingesetzt werden kann. Gerade in kritischen Lagen ist es oft schwer oder unmöglich, einschränkende Bedingungen einzuhalten.
- Die Anwendung der Rückstromdrossel als Drosselorgan für ein Wasserschloss brachte einen vollen Erfolg. Den Baukosten für die Drossel (einschliesslich aller dazugehörigen Baumassnahmen) von rund 7 Mio S steht eine unter denselben Bedingungen berechnete Einsparung von rund 24 Mio S gegenüber.
- Das Durchfahren des Kavitationsbereiches bringt kurzzeitig ziemlich starke Erschütterungen, die in erster Linie den an die Drossel anschliessenden Unterkammerbereich beanspruchen. Direkte Kavitationsschäden traten nach dreijährigem Betrieb lediglich an der Eintrittskante des «Saugrohres» der Drossel in die Unterkammer auf. Diese Stellen wurden mit einer rostfreien Auftragsschweissung gepanzert. Die übrige Drossel, die mit einem Kunstharzanstrich versehen ist, zeigte bisher keine Schäden.

6. Hinweise

Die Veröffentlichung dieses Berichtes wurde dem Verfasser durch das freundliche Entgegenkommen der TIWAG ermöglicht, wofür er hier seinen Dank zum Ausdruck bringen möchte. Insbesondere gilt

sein Dank Direktor Dr. H. Lauffer, dem er auch viele Anregungen verdankt. Ferner möchte er die mühevollen Ausarbeitungen der umfangreichen hydraulischen Berechnungen sowie der Modellversuche der TIWAG erwähnen, die seinem inzwischen tödlich verunglückten Mitarbeiter, Dipl. Ing. Gerold Fessler, zu danken ist. In Druckstofffragen stützten wir uns auf die reiche Erfahrung von Prof. Dr. Ing. G. Hutarew, Technische Hochschule Stuttgart.

Literaturverzeichnis

- [1] Frank und Schüller: Schwingungen in den Zuleitungs- und Ableitungskanälen von Wasserkraftanlagen. Berlin 1938, Springer-Verlag.
- [2] Heim, R.: Versuche zur Ausbildung der Thomaschen Rückstrombremse. Mitteilungen des Hydraulischen Institutes der Technischen Hochschule München, 1929, H. 3.
- [3] Hutarew, G.: Einführung in die Technische Hydraulik. Berlin 1965, Springer-Verlag.
- [4] Jurecka, W.: Die Triebwasserführung der Hauptstufe Kaprun. Festschrift Hauptstufe Glockner-Kaprun, Tauernkraftwerke AG 1951.

- [5] Lauffer, H.: Das Kaunertalkraftwerk. «Österreichische Wasserwirtschaft» 1968, H. 7/8.
- [6] Lauffer, H.: Das Innkraftwerk Prutz-Imst. «Österreichische Wasserwirtschaft» 1955, H. 7.
- [7] Mühlhofer, L.: Zeichnerische Bestimmung der Spiegelbewegungen in Wasserschloßern von Wasserkraftanlagen mit unter Druck durchflossenen Zulaufgerinne. Berlin 1924, Springer-Verlag.
- [8] Ribi, R.: Aus der Projektierung der Kraftwerke Hinterrhein. «Schweizerische Bauzeitung» 78 (1960), H. 17. S. 283–288.
- [9] Stucky, A.: Druckwasserschloßer von Wasserkraftanlagen. Berlin 1962, Springer-Verlag.
- [10] Tonacca, E.: Erweiterung des Wasserschloßes des Kraftwerkes Cimego. «L'Energia Elettrica» 1963, H. 3.
- [11] Zobel, R.: Versuche an der hydraulischen Rückstromdrossel. Dissertation Technische Hochschule München 1934.

Adresse des Verfassers: Dr. Ing. Gerhart Seeber, Humboldtstrasse 14, A-6060 Solbad Hall.

Zur Linienführung der Nationalstrasse N3 im Raume Brugg

DK 625.711.1

Von Dr. sc. techn. J. Killer, Baden

In der «Schweiz. Bauzeitung» vom 20. Nov. 1969 (H. 47, S. 927) erschien ein Aufsatz «Die Überquerung des Aaretals durch die Autobahn N3 in der Gegend von Brugg», verfasst von Hans Marti, Planer. Die darin enthaltene Stellungnahme zu den beiden zur Diskussion stehenden Varianten – offizielles Projekt mit Hochbrücke, und die von privater Seite vorgeschlagene Linienführung über Schinznach-Bad mit einem Bözbergtunnel – fusst auf verschiedenen Annahmen, die nicht der Wirklichkeit entsprechen. So liegt zum Beispiel beim Bözbergtunnel der Kulminationspunkt nicht in Tunnelmitte, sondern der Tunnel weist eine durchgehende Steigung von 1,8 % auf. Der höchste Punkt liegt beim nördlichen Tunnelausgang auf Kote 468.

Diese Veröffentlichung bietet nun die Möglichkeit, nicht nur eine Richtigstellung vorzunehmen, sondern vor allem die mit dem ganzen Fragenkomplex aufgeworfenen Probleme in der Fachpresse aufzurollen und zu beleuchten.

Der Schreibende hat den Vorschlag für eine Führung der N3 über Schinznach-Bad im März 1967 den Behörden unterbreitet. Veranlassung dazu war damals die geplante Hochbrücke, welche zu nahe am Baugebiet von Umiken und Brugg vorbeiführt und für diese Gegend einen grossen Eingriff in die Landschaft bedeutet. Zudem würde die 1,6 km lange und 60 m hohe Brücke den herrlichen Ausblick vom Bözberg aufs Aaretal und die Gegend von Brugg brutal zerschneiden. Das selbe gilt für den Blick von Brugg aus westwärts, aaretalaufwärts, mit den Jurabergen im Hintergrund.

In vielen Zeitungsberichten, in Versammlungen und in Diskussionen wurde das Problem behandelt. Auch wurden verschiedene Vorstösse im kantonalen Parlament unternommen. Am 9. Juli 1968 fand in Brugg in Anwesenheit der vollzähligen aargauischen Regierung, der betroffenen Gemeinden und der interessierten Verbände ein Hearing statt, an dem «Für» und «Wider» der beiden Varianten eingehend erläutert und diskutiert wurden. Anschliessend wurde von der Regierung ein gesamtwirtschaftliches Gutachten in Auftrag gegeben, welches im Dezember 1968 abgeliefert wurde.

Wenn auch der Zeitbedarf für die Abklärung aller der aufgeworfenen Fragen sehr gross war – das generelle Projekt wurde im Januar 1967 in den Kanzleien der betroffenen Gemeinden aufgelegt – so hat es sich doch insofern gelohnt, als man gezwungen war, alle Probleme einmal gründlich zu studieren und von allen Seiten zu beleuchten. Daraus ergaben sich neue Gesichtspunkte. Die Hochbrücke als solche spielt dabei eine untergeordnete Rolle. Die Fragestellung lautet heute eindeutig: «Führen wir die N3 über den Bözberg, oder meiden wir den Pass und führen wir die Autobahn durch einen Tunnel?»

Beim Abschnitt der N3 zwischen Basel und Zürich handelt es sich zweifellos um eine Strecke von internationaler Bedeutung. Die beiden Städte Basel und Zürich haben ein grosses Interesse daran, dass für diese Autobahn der kürzeste und sicherste Weg gewählt wird. Der Entscheid darf nicht danach gefällt werden, ob die Linienführung dieser Gemeinde zusagt

oder jene sie ablehnt, noch darf die Linienführung auf Grund der heutigen Verkehrs- und Besiedlungsverhältnisse beurteilt werden. Vielmehr muss die kommende Besiedlungs- und Bevölkerungszunahme, sowie der künftige Grad der Motorisierung mitberücksichtigt werden. Und da der Kanton Aargau mit seiner immer grösseren Verkehrsgunst, zwischen den Städten Basel und Zürich gelegen, zu einem bevorzugten Gebiet für die Ansiedlung neuer Industrien gehört – die Bevölkerung hat von 1960 bis heute um 30 % zugenommen – so spielt gerade die Miteinbeziehung dieser künftigen Entwicklung in die Beurteilung der Linienführung eine entscheidende Rolle. Bereits hat der Kanton Aargau die ersten Grundlagen für ein künftiges aargauisches Besiedlungsleitbild geschaffen. Es wäre deshalb höchst unklug, die Entscheide bezüglich der Ausführung von Bauobjekten der gegenwärtigen Besiedlung entsprechend zu fällen. Im planungsfreudigen Aargau würde dies nicht verstanden.

Verkehrskonzeption

Beim Festlegen der Linienführung für die Nationalstrasse N3 im Raume Brugg muss mitberücksichtigt werden, dass die geplante Aaretalstrasse Olten—Aarau—Brugg—Koblenz, mit deren etappenweisem Ausbau bald begonnen wird, im Endausbau den Charakter einer vierspurigen, kreuzungsfreien Autostrasse aufweisen wird. Dies scheint auch gerechtfertigt, wenn man in Betracht zieht, dass sich im Aaretal immer mehr Industrien ansiedeln und daher der Verkehr rasch zunehmen wird. Das Projekt der Aaretalstrasse selbst ermöglicht grosszügige zukünftige Erweiterungen.

Wir werden es also im Raume Brugg künftighin mit zwei sich kreuzenden Autobahnen zu tun haben. Grundbedingung für die Gestaltung eines derartigen Knotenpunktes ist, dass man direkt von einem auf den anderen Verkehrsträger wechseln kann. Das bedingt, dass das Niveau beider Autobahnen am Kreuzungspunkt ungefähr auf gleicher Höhe liegen muss. Dies ist nun bei der Tunnelvariante im freien Feld von Schinznach-Dorf der Fall, nicht aber beim offiziellen Projekt mit einer Hochbrücke, weil das Niveau der Aaretalstrasse an der Kreuzungsstelle einige Dutzend Meter tiefer liegt als die N3, und an dieser Stelle deshalb ein direkter Übergang von einer Strasse zur anderen infolge der topographischen Verhältnisse unmöglich ist. Um von der N3 auf die Aaretalstrasse zu gelangen, müsste man entweder das Anschlussbauwerk Birrfeld oder Bözberg benutzen. Man wäre gezwungen, die Aaretalstrasse zu verlassen, um über den Umweg von einigen Kilometern Landstrasse die N3 zu erreichen, oder umgekehrt. Wenn die Hochbrücke gebaut würde, wäre am Kreuzungspunkt dieser beiden Autostrassen eine verkehrstechnische Unmöglichkeit vorhanden, wie sie wahrscheinlich nirgendwo sonst anzutreffen sein wird.

Aaretalstrasse bei Schinznach-Bad

Auf dem Gebiet der Gemeinde Schinznach-Bad ist die N3 unterirdisch geführt gedacht, um den Eingriff so klein wie möglich zu halten. Die Entfernung vom Kurhaus Schinznach-Bad beträgt immerhin noch 500 m. Wenn hier Bedenken wegen der all-