Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 53 (1962)

Heft: 20

Artikel: Automatische Regulieranlagen der Stauwehre im Kraftwerk Rheinau

Autor: Elmiger, E.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-916978

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: 27.12.2025

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

köpfen und Filtern über Verstärker zu erfolgen. Mit der Anwendung dieser Mittel erschliessen sich sozusagen unbegrenzte und begeisternde Möglichkeiten zur Vervollkommnung der Programmierungs-Methoden, nicht nur zur automatischen Regulierung einzelner Stauwehre, sondern solcher ganzer Werkverbände.

Adresse des Autors:
G. Leuenberger, Ingenieur, Chr. Gfeller, AG, Bern-Bümpliz.

Automatische Regulieranlagen der Stauwehre im Kraftwerk Rheinau [1])

Von *E. Elmiger*, Baden

627.432.62(494,342.3)

1. Beschreibung des Kraftwerkes Rheinau

Die ausgeprägte Schleifenbildung des Rheines bei Rheinau eignet sich besonders gut für die Errichtung einer Kraftwerkanlage, kommen doch hier Anfang und Ende einer 4,5 km langen Flußschleife einander auf 400 m nahe (Fig. 1).

Die Konzessionsstrecke beginnt am Rheinfallbekken und umfasst die abwärts anschliessende 12 km lange Flußstrecke bis Balm, auf welcher der Rhein bei einer mittleren Jahresabflussmenge von 373 m^3/s 10,6 m Gefälle aufweist, wovon 4,85 m auf die Rheinschleife um das Dorf Rheinau entfallen. Das gesamte Gefälle wird beim Maschinenhaus am Beginn der Schleife konzentriert, indem einerseits durch ein Stauwehr der Oberwasserspiegel um rund 6 m gehoben und anderseits durch zwei Stollen das Gefälle der Schleife abgeschnitten wird. In Erfüllung einer Konzessionsbedingung ist bei der Anlage auf die Möglichkeit einer späteren Rheinschiffahrt durch Tieferlegung von Maschinenhaus und Stollen entsprechend Rücksicht genommen worden.

Die Rheinabflussmenge schwankt zwischen 100 m^3/s beim kleinsten Niederwasser und etwa 1070 m^3/s bei Hochwasser. Die Kraftwerkanlagen sind für ein grösstes Hochwasser von 1250 m^3/s dimensioniert, wobei die Maschinen bis 400 m^3/s verarbeiten können, die durchschnittlich an 135 Tagen des Jahres vorhanden oder überschritten sind. Als Minimalabfluss für die Rheinschleife sind 5 m^3/s vorgeschrieben. Zwei Hilfswehre in der Schleife stauen das Wasser so auf, dass das äussere Bild der Gegend erhalten bleibt.

Im Maschinenhaus sind zwei Kaplanturbinen von je 17 000 kW Leistung eingebaut, die darüber aufgestellten Generatoren speisen über Transformatoren in das 50-kV-Netz der NOK. Die erzeugte Energie (im Mitteljahr etwa 237 Millionen kWh) geht an die drei Partner des Kraftwerkes. Der schweizerische Anteil der Energie wird von der Nordostschweizerischen Kraftwerke AG und der deutsche von der Badenwerk AG sowie der Aluminium Industrie AG bezogen.

2. Die Konstruktion des Stauwehres

Das Stauwehr ist in flachem Bogen über den Rhein erstellt, um sich dem gekrümmten Flusslauf gut anzupassen. Es besteht aus 4 Öffnungen von je 25,5 m lichter Weite. Die vertikale Hubhöhe jedes Verschlusskörpers beträgt 6 m von der Schwelle auf Kote 353 m ü. M. bis zur maximalen Stauhöhe von 359 m ü. M. Auch bei einer geschlossenen Öffnung vermögen die übrigen 3 Durchlässe das grösste Hochwasser von 1250 m^3/s ohne Überstau abzuführen. Für die Konstruktion des Stauwehres wie auch für diejenige der Hilfswehre galt der Grundsatz, eine möglichst ruhig und geschlossen wirkende Bauart zu finden, die so wenig wie nur möglich über das Oberwasser auftragen durfte. Windwerkhäuser kamen nicht in Frage. Deshalb wurde das Stauwehr als hydraulisch betätigtes Sektorwehr ausgeführt. Die Funktionsweise ist aus dem Querschnitt ersichtlich (Fig. 2). Die Stauwand aus Stahlblech hat die Form eines Kreiszylinders mit gerader Überfallwand und kann in den betonierten Wehrkörper versenkt werden. Der bewegliche Sektorteil ist unten offen und stützt sich in seiner ganzen Länge auf die Drehachse ab. Der Dachraum zwischen Wehrschwelle und Sektor ist mit dem Regulierwasser gefüllt. Auf den Sektor wirken folgende Kräfte:

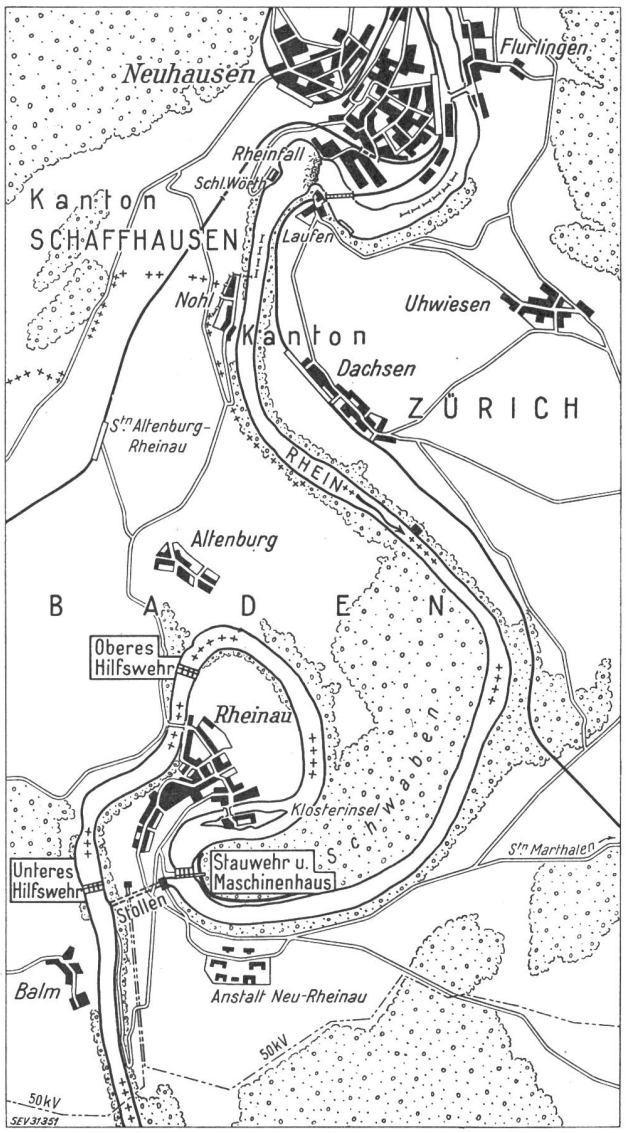
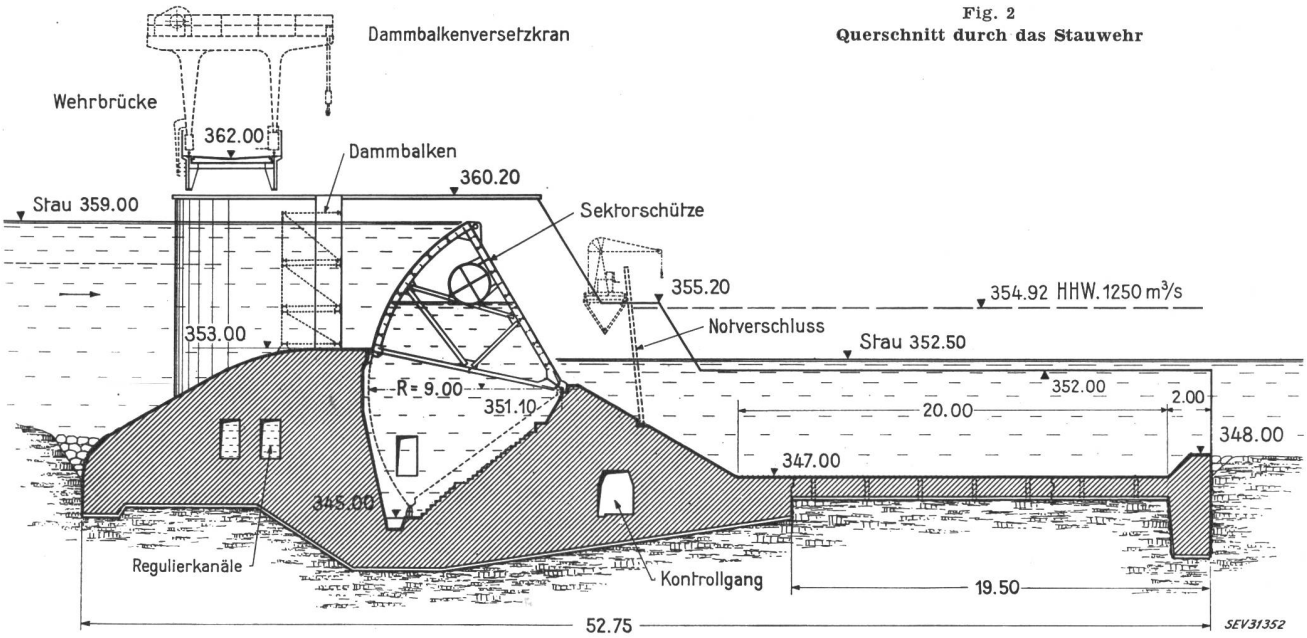


Fig. 1
Übersichtskarte des Konzessionsgebietes

[1]) Vortrag, gehalten an der 12. Tagung der Schweiz. Gesellschaft für Automatik in Zusammenarbeit mit dem SEV, am 3. Mai 1962 in Bern.

Fig. 2
Querschnitt durch das Stauwehr



Die Resultierende aus dem Druck des Oberwassers auf die kreisförmige Stauwand geht durch den Drehpunkt und verursacht kein Drehmoment. Das Eigengewicht der Stahlkonstruktion und die Auflast sowie die dynamischen Kräfte des überströmenden Wassers auf dem Wehrrücken bewirken ein Drehmoment im Senksinne. Dem wirkt entgegen der Druck des Wassers im Sektorraum auf den Wehrrücken und auf das im Wehrinnern angeordnete Schwimmerrohr, welches auch als Torsionsversteifung dient. Für jede im Dachraum eingeschlossene Wassermenge stellt sich so eine bestimmte Wehrhöhe ein. Die nicht zu vernachlässigende Reibung aller Dichtungsflächen an der Wehrbrust und an den Seitenpfeilern wirkt den Wehrbewegungen entgegen. Da jeder Wehrquerschnitt für sich im Gleichgewicht ist, kann das Wehr theoretisch beliebig lang gemacht werden.

Für die hydraulische Verstellung führt vom Raum innerhalb jedes Sektors je ein Kanal nach dem Reguliergebäude am linken Rheinufer. Dort kann er durch Drosselklappen entweder mit dem Oberwasser oder mit dem Unterwasser in Verbindung gesetzt werden. Im ersten Fall strömt Wasser in den Sektor, die Auftriebskräfte nehmen zu und das Wehr steigt. Im andern Fall hingegen entleert sich der Sektor und das Wehr sinkt. Die Geschwindigkeit der Wehrbewegung ist abhängig von der Drosselklappenöffnung. Der maximale Innendruck wird begrenzt durch Überläufe im Reguliergebäude. In der obersten Stellung kann jeder Sektor mechanisch verriegelt werden. Alsdann ist es möglich, ihn zu entleeren, auszupumpen und zu begehen.

3. Die Regulierung des Stauwehres

3.1 Regulierbedingungen

Ein mechanisch durch Windwerk angetriebenes Wehr ändert seine Stellung nur, wenn das Windwerk durch einen Steuerbefehl in Bewegung gesetzt wird. Anders ist es bei einem Wehr, welches in der eben beschriebenen Weise durch den hydraulischen Auftrieb bewegt wird. Der mit dem Regulierwasser teilweise gefüllte Innenraum muss sowohl gegen das Oberwasser wie auch gegen das Unterwasser abgedichtet werden. An den Gleitflächen lässt sich diese Dichtung kaum absolut bewerkstelligen, da sonst die Reibung zu hoch würde. Sickerwasser vom Oberwasser in den Regulierraum bewirkt ein Heben des Wehres, solches vom Regulierraum nach dem Unterwasser ein Senken desselben. Je nach dem Überwiegen des einen oder des anderen Effektes wird das Wehr ohne äussere Eingriffe dauernd steigen oder sinken. Bereits das Einhalten einer bestimmten Lage setzt also dauernde Steuereingriffe voraus oder besser eine automatische Regulierung.

Aus den Konzessionsbedingungen ergeben sich für das Stauwehr Rheinau weitere Regulieraufgaben (Fig. 3):

Es ist in erster Linie festgelegt, dass der gestaute Wasserspiegel im Rheinfallbecken auf konstanter Höhe gehalten wird, solange dieser Stau über dem vor der Errichtung des Stauwehres bei gleicher Wassermenge vorhandenen natürlichen Wasserstand liegt. Bei grösseren Wassermengen darf der Rheinfallbeckenstand entsprechend diesen natürlichen Ständen ansteigen. Der Stauspiegel am Stauwehr liegt um den Strömungs-

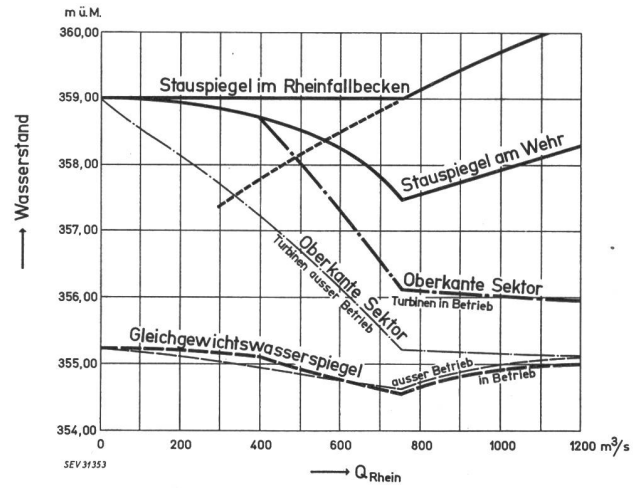


Fig. 3
Wasser- und Wehrstände im Rheinfallbecken und am Stauwehr
Q_{Rhein} Wasserführung des Rheines oberhalb des Kraftwerkes

widerstand der etwa 7 km langen Flußstrecke unter dem Stand im Rheinfallbecken. Bei Hochwasser beträgt der Unterschied etwa 2 m. Ist die Rheinwasserführung grösser als 400 m³/s, d. h. der konzessionierten Turbinenwassermenge, so muss der Überschuss über das Wehr abgeführt werden, unter Einhaltung der angegebenen Bedingung. Es liegt der Fall der Wasserstandregulierung vor. Bei Hochwasser und Betrieb des Maschinenhauses muss die Sektoroberkante etwa 2 m unter den Stauspiegel am Wehr gesenkt werden. Der gesamte Regulierbereich des Sektors beträgt etwa 3 m. Änderungen des Überfalles wirken sich aber je nach Wasserführung mit einer Verzögerung in der Grössenordnung von Stunden auf den Stand im Rheinfallbekken aus. Die Regulierung muss dieser grossen Totzeit angepasst sein.

Liegt die Wassermenge des Rheines aber unter 400 m³/s, so erfolgt die Regulierung des Wasserstandes durch Veränderung des Turbinendurchflusses von Hand. Die Restwassermenge durch die Rheinschleife muss aber dauernd mindestens 5 m³/s betragen und zwar ist vorgeschrieben, dass das Wasser gleichmässig verteilt über die Wehröffnungen fällt. Diese Vorschrift führt zur Regelbedingung, dass jede Wehroberkante um einen festen Betrag (etwa 10 cm) unter dem je nach Rheinwasserführung variablen Oberwasser gehalten werden soll: Überfallregulierung.

3.2 *Regulierprinzip*

Das Regulierprinzip der Stauwehrregulierung lässt sich am besten an Hand des Signalflussbildes erklären (Fig. 4). Darin sind 3 ineinandergeschachtelte Regelkreise erkennbar (*A*, *B* und *C*). Der innerste Regelkreis, die eigentliche Wehrregulierung, ist für jede Wehröffnung vorhanden und hält die Schützenoberkanten individuell auf der gewünschten Sollhöhe. Bei Überfallregulierung ist dieser Kreis allein in Tätigkeit.

Die vertikale Stellung jeder Schützenoberkante wird, in noch zu beschreibender Weise, nach dem Regler übertragen und dort die Überfallhöhe als Differenz zum ebenfalls fernübertragenen Wasserstand gebildet.

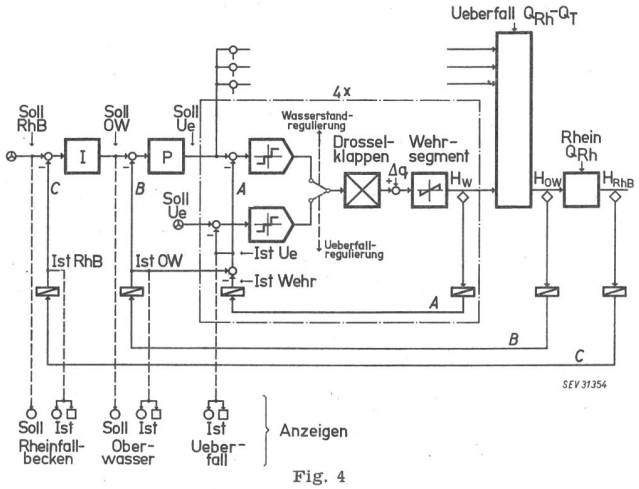


Fig. 4

Signalflussbild der Stauwehrregulierung

A 1. Regelkreis (Überfall der 4 Wehröffnungen); *B* 2. Regelkreis (Wasserstand beim Stauwehr); *C* 3. Regelkreis (Wasserstand im Rheinfallbecken)

H_W Stellung Wehroberkante; H_{OW} Wasserstand beim Wehr; H_{RhB} Wasserstand im Rheinfallbecken; Δq Sickerwasser zum Sektorraum; Q_{Rh} Wasserführung des Rheines; Q_T Wassermenge durch die Turbinen; *I* integral wirkender Regler; *P* proportional wirkender Regler

Ein weiteres Differenzwerk ermittelt die Abweichung dieses wirklichen Überfallwertes vom fest eingestellten Sollwert bei *Überfallregulierung* und beaufschlagt damit ein Kontaktwerk, welches als Dreipunktglied bei Überschreitung eines zulässigen Unempfindlichkeitsbereiches die Einlauf- oder die Auslaufdrosselklappe zum Wehrsegment bis zu einem Endschalter öffnet. Das Wehr bewegt sich mit etwa 20 cm/min, bis die Abweichung kleiner als zulässig geworden ist. Unempfindlichkeitsbereich und Wehrgeschwindigkeit sind so gewählt, dass die Regulierung stabil erfolgt. Als Störwert tritt die Sickerwassermenge q zum Sektorraum auf. Sie wird hier dadurch einigermassen kompensiert, dass auch die Endschalter «Zu» der Drosselklappenantriebe verstellbar sind. Meist überwiegt das Sickerwasser vom Oberwasser zum Sektorraum und bewirkt eine Tendenz zum Heben des Wehres (nach Messungen z. B. etwa 2 cm/min). Der Endschalter «Zu» der Auslaufdrosselklappe wird nun von Hand so eingestellt, dass der grösste Teil dieses Wassers dauernd abfliesst und nur noch eine sehr langsame Hubtendenz übrigbleibt. Damit lässt sich erreichen, dass bei ruhigem Betrieb die Apparatur nur alle paar Stunden einen Steuerimpuls abgeben muss, statt alle paar Minuten, wie ohne Korrektur.

Bei Umschaltung auf *Wasserstandregulierung* arbeitet der innere Regulierkreis gleich wie bereits beschrieben. Die Regulierabweichung wird aber im Vergleich zu einem variablen Überfall-Sollwert gebildet und über ein Kontaktwerk mit etwas grösserem Unempfindlichkeitsbereich verarbeitet. Der Überfall-Sollwert wird durch den zweiten Regelkreis über ein Proportionalglied aus der Differenz zwischen Einstell- und Istwert des Oberwasserstandes gewonnen. Der einregulierte Überfall beträgt also ein festes Vielfaches des Überstaues. Im vorliegenden Fall wurde der Übertragungsfaktor 6 gewählt, d. h. jede Erhöhung des Oberwasserstandes um 1 cm vergrössert den Überfall um 6 cm, d. h. senkt das Wehr um 5 cm.

Die beschriebene Proportionalregulierung arbeitet bei richtiger Wahl des Übertragungsfaktors rasch und stabil. Sie hat aber den Nachteil, dass der Oberwasserstand nicht konstant bleibt. Weiter besteht ja die Regulieraufgabe darin, den Wasserstand im Rheinfallbecken konstant zu halten, 7 km flussaufwärts vom Stauwehr. Die Lösung bringt der übergeordnete dritte Regelkreis. Darin wird die Differenz zwischen dem von Hand eingestellten, festen Sollwert des Wasserstandes im Rheinfallbecken mit dem Istwert gebildet. Überschreitet sie einen bestimmten Wert, so wird der Einstellwert des Oberwasserstandes am Wehr durch einen Tastregler dauernd langsam verstellt, so langsam, dass einerseits keine Pendelungen auftreten und anderseits die Regulierung auch den schnellsten natürlichen Änderungen der Rheinwassermenge folgen kann. Beim Ausfall einer Turbine erfolgt die Verstellung allerdings zu langsam und es muss von Hand nachgeholfen werden. Die Regelabweichung ohne Handverstellung ist aber nicht gross, wie folgendes Beispiel zeigt: Rheinwasserführung 450 m³/s; 400 m³/s fliessen durch die beiden Turbinen, 50 m³/s über die 4 Wehröffnungen, der notwendige Überfall beträgt etwa 40 cm. Beim Ausfall einer Turbine müssen 200 m³/s mehr über das Stauwehr fliessen, der Überfall muss auf etwa 110 cm erhöht werden. Durch die Proportionalregulierung erfolgt dies mit einer Erhöhung des Wasserstandes am Wehr von 12 cm, was in einem seltenen

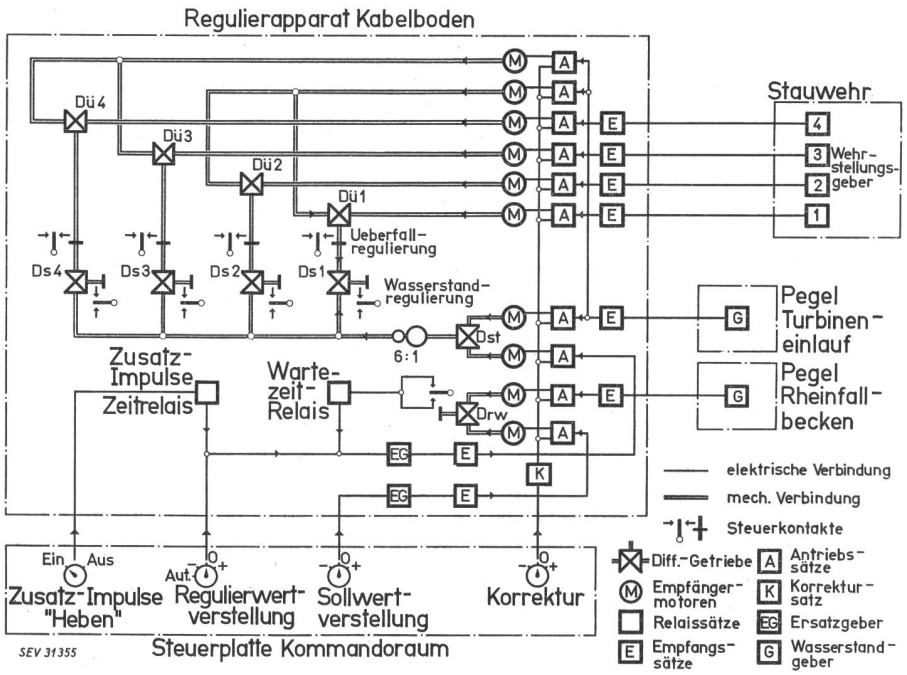


Fig. 5
Apparateschema der Stauwehrregulierung
Drw Differentialgetriebe «Rheinfallbecken»; *Ds* Differentialgetriebe «Wasserstand»; *Dst* Differentialgetriebe «Überstau»; *Dü* Differentialgetriebe «Überfall»

Störungsfalle zulässig ist. Bei einer grösseren Wasserführung ist die notwendige Überfallvergrösserung und damit auch der Überstau kleiner, da die Wassermenge über einen Überfall stärker als linear mit der Überfallhöhe zunimmt.

Bereits im Projektierungsstadium wurden mit dem vorgesehenen Regulierschema einige Regulierfälle durchgerechnet, um die Stabilität, die Genauigkeit und die ausreichende Schnelligkeit der Regulierung nachzuprüfen sowie die günstigsten Grössen des Übertragungsfaktors, der Unempfindlichkeitsbereiche und der Wehr-Verstellgeschwindigkeiten zu bestimmen. Dabei waren hauptsächlich folgende Einflüsse zu berücksichtigen:

a) Endliche Verstellzeit der Regulierdrosselklappen, d. h. etwa 15 s zum Öffnen bzw. Schliessen;

b) Notwendige Änderung der Regulierwassermenge im Sektor. Diese ist abhängig von der Wehrstellung, dem Überfall (Wasserauflast) und den Reibungskräften, die der Wehrbewegung entgegenwirken. Die Reibung hat speziell zur Folge, dass zum Einleiten einer Bewegung wesentlich mehr Wasser in den Sektor hinein- oder daraus herausgelassen werden muss, wenn die vorherige Bewegung des Wehres entgegengesetzt zum neuen Befehl erfolgt, als wenn der Befehl in gleicher Richtung geht. Im ersten Fall setzt sich das Wehr erst etwa 60 s nach dem Steuerbefehl in Bewegung, im andern Fall hingegen schon nach 15 s, also sobald die Drosselklappe verstellt ist;

c) Wasserschlosswirkung der für die Druckbegrenzung oben offenen Kammern bei den Drosselklappen im Reguliergebäude zusammen mit der Wassersäule in den Regulierkanälen zur Wehröffnung. Besonders bei den weiter vom Regulierhaus entfernten Wehröffnungen bewirkt dieser Effekt einen merkbaren Nachlauf des Sektors nach Schluss des Reguliervorganges, der infolge des Reibungseinflusses mit dem rückwärtspendelnden Wasser nicht zurückgeht;

d) Endliche Laufzeit der vom Wehr ausgehenden Schwall- oder Sunkwellen zum beim Turbineneinlauf etwa 70 m stromaufwärts aufgestellten Oberwasserpegel;

e) Änderung des Wasserstandes am Pegel Turbineneinlauf und im Rheinfallbecken in Abhängigkeit von Rheinwasserführung, Turbinenwassermenge und Überfallwassermenge;

f) Fernübertragung aller Messwerte in Stufen.

Die meisten der aufgezählten Einflüsse bewirken ein gewisses Nachlaufen der Wehrstellung, bzw. des Wasserstandes nach dem Aufhören des Regulierbefehles. Der Unempfindlichkeitsbereich des Dreipunktreglers muss breiter als dieser Nachlauf gewählt werden, sonst wird nach dem Schluss eines Befehls der Gegenbefehl eingeleitet und das Wehr pendelt. Der zulässigen Breite des Unempfindlichkeitsbereiches sind aber anderseits durch die Anforderungen an die Genauigkeit der Regulierung Grenzen gesetzt. Ist der Nachlauf zu gross, so kann die Regulierung dadurch verbessert werden, dass die Drosselklappenöffnung proportional zur Regelabweichung gemacht wird. Dadurch lässt sich erreichen, dass einerseits grössere Abweichungen mit der raschestmöglichen Wehrgeschwindigkeit ausreguliert werden, anderseits aber bei der Annäherung an den Sollwert die Wehrbewegung sanft und ohne merkliches Überschiessen abgestoppt wird. Bei einer proportionalen Verstellung der Drosselklappenöffnung würde auch das Sickerwasser in den Sektorraum automatisch korrigiert.

Die Rechnungen ergaben, dass bei den günstigen Verhältnissen in Rheinau die einfachere Lösung mit konstanter Wehrgeschwindigkeit den Anforderungen genügt. Dies wurde durch die Betriebserfahrung in vollem Umfange bestätigt.

3.3 Regulierapparate

Für die Übertragung und die Anzeige von Wasser- und Wehrständen haben sich Geräte gut bewährt, welche die Änderungen des Messwertes stufenweise übertragen. Wenn die Stufen genügend klein gewählt sind und dafür gesorgt wird, dass keine Impulse verloren gehen, ergibt sich eine sehr genaue Übertragung. Beim Stauwehr werden z. B. 6 m Hubbewegung in Impulsen von 1 cm übertragen. Ein weiterer Vorteil liegt in der Einfachheit der Apparate und dem kräftigen Drehmoment auf der Empfangsseite, das ohne komplizierte Verstärker zur Verfügung steht.

Es lag nahe, für die Regulierung die gleichen Übertragungsapparaturen zu verwenden. Ihr Zusammenarbeiten ist aus dem Apparateschaltbild (Fig. 5) ersichtlich.

Die Wasserstände im Rheinfallbecken und beim Turbineneinlauf vor dem Stauwehr werden durch Schwimmer erfasst, die zugehörigen Geber *G* veranlassen bei jeder Standänderung von 1 cm im Rheinfallbecken bzw. von 1/2 cm beim Turbineneinlauf je einen Änderungsimpuls über Kabel zu den Empfangsapparaten *E*, die über Antriebssätze *A* die zugehörigen Verstellmotoren *M* um einen festen Betrag vorwärts oder rückwärts laufen lassen.

Beim Stauwehr interessiert nur die vertikale Höhenlage der Wehrkante. Diese wird von der Wehrdrehachse über einen Hebel in den Stauwehrpfeilern abgenommen, der durch einen Parallelführungsapparat einen Schlitten im Maßstab 1 : 10 der wirklichen Wehrbewegung verstellt. Der daran angeschlossene Geber schaltet nach jedem Millimeter Weg, so dass die Wehrhöhe in Stufen von 1 cm übertragen wird.

Im Regulierapparat im Kabelboden stehen alle notwendigen Werte als Drehwinkel von Wellen zur Verfügung und werden entsprechend dem Signalflussbild der Regulierung verknüpft. Zunächst bilden 4 Differentialgetriebe *Dü 1...Dü 4* aus dem Unterschiede von Wasserstand und Wehrhöhe die Überfallhöhe an jeder Wehröffnung. Von auf den Sollwert der Überfallregulierung fest eingestellten Kontaktwerken werden die Steuerbefehle an die Regulierdrosselklappen für die Überfallregulierung abgenommen. Die Lieferfirma hat eine sehr elegante Lösung für das nicht einfache Problem gefunden, ein mechanisches Kontaktwerk zu konstruieren, das auf einen Impuls genau am vorbestimmten Ort schaltet und dabei gegen 1000 Impulse verarbeiten kann.

Für die Wasserstandregulierung hingegen soll der gewünschte Überfall gleich einem bestimmten Vielfachen des Überstaues, d. h. des Unterschiedes zwischen Einstell- und Istwert des Oberwasserstandes sein, wie dies aus dem Signalflussbild ersichtlich ist. Zu diesem Zweck wird der im Differentialgetriebe (*Dst*) gewonnene Überstau (d. h. der Unterschied zwischen Ist- und Einstellwert des Wasserstandes beim Turbineneinlauf) in einem Übersetzungsgetriebe z. B. sechsfach vergrössert, der erhaltene Soll-Überfall in 4 weiteren Differentialgetrieben (*Ds 1...Ds 4*) mit den wirklichen Überfällen verglichen und je nach der Abweichung über Kontaktwerke die entsprechenden Steuerbefehle abgegeben.

Als dritter, übergeordneter Regulierkreis wird schliesslich im Differentialgetriebe *Drw* der Unterschied zwischen dem von Hand eingestellten Sollwert und dem Istwert des Wasserstandes im Rheinfallbekken gebildet. Wenn diese Abweichung zu gross ist, gibt ein Wartezeitrelais (*WR*) in einstellbaren Zeiten (z. B. 1/2stündlich) je einen Korrekturimpuls «Höher» oder «Tiefer» an den Einstellwert des Oberwasserstandes, sofern der Schalter «Regulierwertverstellung» auf «Automatisch» steht. Der Regulierwert kann auch von Hand verstellt werden. Schliesslich ist noch eine Einrichtung zur automatischen Abgabe von Zusatzimpulsen «Höher» an den Einstellwert eingebaut mit einem Zeitrelais *ZJ*, das mit wesentlich grössern Wartezeiten als *WR* arbeitet. Damit wird erreicht, dass der Stauspiegel sich immer an der obern Grenze des Toleranzbandes einstellt und das Gefälle optimal ausgenützt wird.

Die beschriebenen Regulierapparate sind in einem Schrank unter dem Kommandoraum des Kraftwerkes aufgestellt.

Auf Fig. 6a sind die Anzeige- und Steuerapparate im Feld «Wasser» des Kommandoraumes ersichtlich. In der rechten Hälfte des Anzeigeapparates werden die wichtigsten Werte der Rheinwasserführung angezeigt: Wassermenge (ferngemeldet von einem geeichten Pegel oberhalb des Rheinfalles), Wasserstand im Rheinfallbecken und beim Turbineneinlauf, beide mit Tendenzpfeilen; Gefälle und Wasserstand am Turbinenauslauf getrennt für jede Maschinengruppe und schliesslich noch der Wasserstand im Rhein beim Ausfluss der beiden Stollen. Im mittleren Registrierteil werden diese Stände aufgezeichnet. Das linke Anzeigefeld ist für das Stauwehr bestimmt. Es zeigt den Sollwert des Rheinfallbeckenstandes und den sog. Regulierwert (d. h. Einstellwert) der Wasserstandsregulierung. Weiter ist für jede Öffnung der Überfall in cm und an einem kleinen Modell die Wehrstellung in bezug auf den Wasserstand ersichtlich.

Unterhalb dieses Anzeigeapparates befinden sich zwei Steuerplatten. Auf der rechten lassen sich der

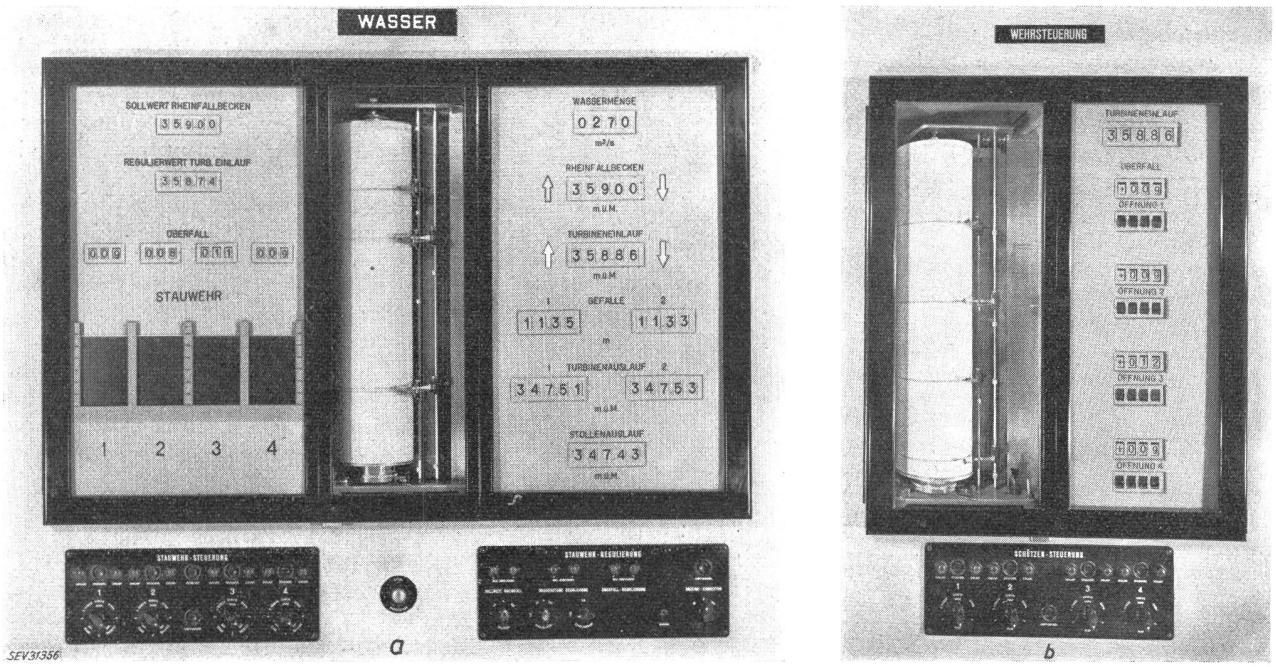


Fig. 6
Anzeige- und Steuerapparate zum Stauwehr

a Feld «Wasser» im Kommandoraum (Registrierung der Wasserstände);
b Steuer-Anzeige- und Registrierapparat im Reguliergebäude des Stauwehres (Registrierung des Überfalles jeder Wehröffnung)

Sollwert Rheinfallbecken und der Regulierwert Turbineneinlauf verstellen sowie die erwähnten Zusatzimpulse «Höher» einschalten. Signallampen zeigen an, wenn die Wasserstände im Rheinfallbecken oder am Turbineneinlauf die Toleranzgrenzen erreicht haben. Auf der linken Steuerplatte befindet sich für jede Wehröffnung ein Drehschalter mit den Stellungen Hand — Heben, — Senken, — Schnell senken, Automatisch — Wasserstand und Automatisch — Überfall. Die Hand-Steuerbefehle wirken nur solange, als der darüber befindliche Druckknopf betätigt wird. Sind grössere Verstellungen nötig, so kann durch die gleichzeitige Betätigung des Druckknopfes «Zeit» eine längere Wehrbewegung (z. B. 20 s) bewirkt werden, ohne dass dauernd der Knopf betätigt werden muss. Kontrollampen leuchten hier für jede Öffnung solange, als eine Steuerdrosselklappe geöffnet ist.

Im Reguliergebäude des Stauwehres werden die Grösse des Überfalles jedes Sektors und der Oberwasserstand anzeigt und registriert (Fig. 6b). Dort befindet sich auch eine zweite Steuerplatte für die Handsteuerung. Schliesslich ist es im Notfalle möglich, die daneben aufgestellten Drosselklappenantriebe von Hand zu betätigen.

Ein Zentral-Registrierapparat im Kommandoraum registriert auf einen kontinuierlich ablaufenden Papierstreifen mit 32 Schreibspuren alle wichtigen Steuer- und Regulierbefehle. Damit lassen sich z. B. die Endschalter «Zu» der Auslaufdrosselklappen optimal einstellen. Aus dem Diagramm wäre bei irgend einem falschen Manöver ersichtlich, ob dieses vom automatischen Regulierapparat oder aber durch einen Handeingriff verursacht wurde.

Ein unbemerktes Versagen der Regulierung eines Stauwehres könnte sehr schwere Folgen haben. Deshalb wird die Einhaltung aller Regulierbedingungen dauernd überwacht. Das Abweichen einer Wehröffnung oder eines Wasserstandes von ihrem Sollwert bewirkt einen Alarm, sobald diese Abweichung etwas grösser ist als der eingestellte Toleranzwert. Akustische und optische Meldungen erfolgen weiter bei Störungen im elektrischen und mechanischen Teil der Apparaturen.

4. Die Regulierung der Hilfswehre

Während etwa 230 Tagen des Jahres, hauptsächlich von Mitte September bis Mitte Mai, vermögen die beiden Maschinengruppen des Kraftwerkes die ganze Wasserführung des Rheines zu schlucken und durch die Rheinschleife fliesst nur die Dotierwassermenge von 5 m³/s, welche, wie beschrieben, durch die Überfallregulierung des Stauwehres abgegeben wird. Um diese Dotierwassermenge nicht als schmales Band den Talweg des Flusses hinunterfliessen zu lassen, wird

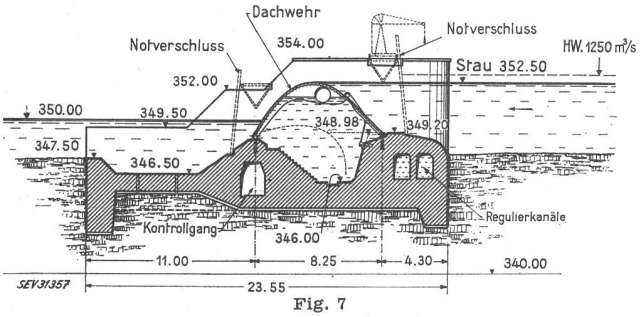


Fig. 7
Querschnitt durch das Hilfswehr
HW Hochwasserstand des Oberwassers (Wehr niedergelegt)

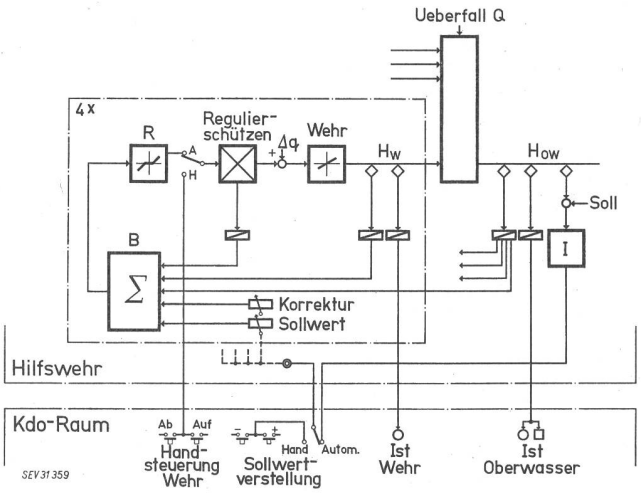


Fig. 8
Signalflussbild der Hilfswehrregulierung
A automatische Regulierung; *H* Handsteuerung; *B* Brückenschaltung (Summierung der Einflüsse); *R* Fallbügelregler
Weitere Bezeichnungen siehe Fig. 4

die Rheinschleife durch zwei Hilfswehre um je 2,5 m auf die mittleren Wasserstände von 352,5 m ü. M. und 350,0 m. ü. M. gestaut.

Diese Hilfswehre sind als hydraulisch betätigte Dachwehre gebaut, ähnlich wie beim Stauwehr auch mit jeweils 4 Öffnungen von 25 m lichter Weite. Eine Wehrbrücke fehlt vollständig, und der Zugang zu den Pfeilern mit den darin befindlichen Apparaten erfolgt durch einen Kanal im Fundamentkörper der Wehre (Fig. 7). Weitere Kanäle verbinden die einzelnen Dachräume mit den Reguliergebäuden auf dem schweizerischen Rheinufer, in denen die Regulierapparate untergebracht sind. Die Betätigung der Wehre geschieht genau gleich wie beim Stauwehr durch Verbindung der Dachräume entweder mit dem Ober- oder mit dem Unterwasser.

Die Regulieraufgabe ist hier etwas einfacher als beim Stauwehr, da nur auf konstanten Oberwasserstand reguliert werden muss. Die Entfernung der unbedienten Hilfswehre vom Maschinenhaus liess es aber als wünschenswert erscheinen, eine Regulierung zu wählen, welche möglichst wenig menschliche Eingriffe voraussetzt.

Wie das Signalflussbild (Fig. 8) zeigt, ist die Regulierung etwas anders aufgebaut als beim Stauwehr. Ein einziger Regler pro Wehröffnung verarbeitet gleichwertig die verschiedenen Signale, nämlich Oberwasserstand, Wehrstellung und auch die Stellung der Regulierschützen, welche den Zu- und Abfluss des Wassers nach den Dachräumen bewirken. Über eine Handeingabe können alle Öffnungen auf gleicher Höhe abgeglichen werden und schliesslich wirkt eine Sollwertverstellung gleichmässig auf alle Öffnungen eines Wehres. Diese Sollwert-Verstellung kann entweder von Hand vom Kommandoraum aus erfolgen oder automatisch von einem Schwimmerkontakt über Wartezeitrelais abgenommen werden, um als integral wirkende Tastregelung die Proportionalabweichung zu korrigieren.

Bei den Hilfswehren steht die gewünschte Reguliergenauigkeit der Wehroberkante von einigen cm zum ganzen Verstellbereich des Wehres (etwa 2 m) in einem Verhältnis, welches sich mit analogen Widerstandsgebern gut beherrschen lässt. Alle Regulierein-

flüsse werden deshalb als Widerstandsänderungen erfasst, welche in einer Brückenschaltung zusammengefasst sind (Fig. 9). In der Diagonalen ist ein Fallbügelregler eingebaut, der bei Abweichungen vom Gleichgewichtszustand Impulse von zur Abweichung proportionaler Dauer an die Verstellmotoren der Regulierschützen abgibt (Zweilauf-Tastregler). Dabei sorgt eine Folgeschaltung dafür, dass nie die Einlauf- und die Auslaufschütze einer Wehröffnung gleichzeitig geöffnet sein können. Nehmen wir einmal an, bei richtigem Oberwasserstand seien die Regulierschützen eines Dachwehres geschlossen. Infolge Sickerwasser vom Oberwasser in den Dachraum hebt sich das Wehr langsam. Durch Verstellung des vom Wehr betätigten Widerstandsgebers S_W wird die Brücke aus dem Gleichgewicht gebracht, der Fallbügelregler wird von einem Strom durchflossen und gibt Impulse «Senken» ab, welche den Auslaufschieber öffnen. Dadurch wird aber die Brücke bereits wieder abgeglichen und die Verstellimpulse hören auf, wenn die Auslaufschieberöffnung gerade dem Sickerwasserzufluss entspricht und deshalb die Wehrbewegung zum Stillstand kommt. Die Regulierung gleicht also die variablen Sickerwasserzuflüsse automatisch aus, mit einer proportionalen Wirkung auf die Wehrstellung. Ebenfalls sind Oberwasserstandabweichung und Wehrstellung zueinander proportional. Mit den eingebauten Empfindlichkeitseinstellern sind die Abhängigkeiten so gewählt, dass 1 cm Oberwasseränderung etwa 5 cm Wehrverstellung zur Folge hat. Da die Zeitkonstante des Oberwasserstandes viel grösser ist als diejenige der Wehrbewegung und diese wieder wesentlich grösser als diejenige der Regulierschieberverstellung, erfolgen die erwähnten Regelvorgänge praktisch ohne Pendelungen, wenn alle Organe mechanisch in Ordnung sind. Die Regulierapparate der einzelnen Öffnungen sind voneinander vollständig unabhängig. Einzig die vier Widerstandsgeber des Oberwasserstandes und des Sollwertes eines ganzen Wehres sind je auf einer gemeinsamen Achse montiert und werden miteinander verstellt.

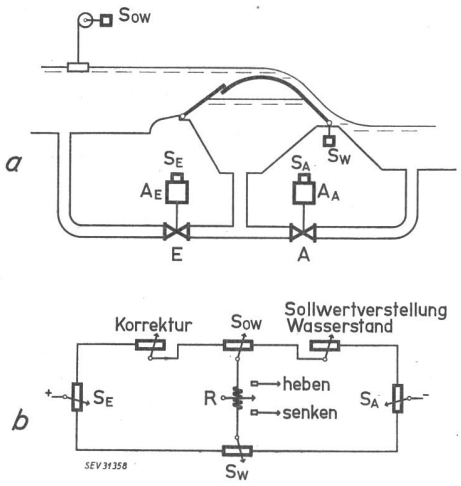


Fig. 9
Apparateschema der Hilfswehrregulierung
a hydraulisches Schema; *b* Brückenschaltung
A Regulierschütze «Auslauf»; *E* Regulierschütze «Einlauf»; A_A Antrieb der Auslaufschütze; A_E Antrieb der Einlaufschütze; *R* Fallbügelregler; S_A Widerstandsgeber «Auslaufschützenstellung»; S_E Widerstandsgeber «Einlaufschützenstellung»; S_{OW} Widerstandsgeber «Oberwasserstand»; S_W Widerstandsgeber «Wehrstellung»

Die Fernmeldung der Stellung der Hilfswehrverschlüsse und der Oberwasserstände nach dem Kommandoraum erfolgt ähnlich wie beim Stauwehr, aber hier vollständig getrennt von der Regulierung. Damit besteht die Möglichkeit, bei einem Versagen der Hilfswehrregulierung im Kommandoraum auf Handsteuerung umzuschalten und den Betrieb von Hand zu führen, ohne dass sich jemand sofort nach den ziemlich entfernten Wehren begeben muss.

Über zwei Signalkabeladern lassen sich mittels einer Schrittschaltapparatur eine grössere Zahl Störungsmeldungen nach dem Kommandoraum übertragen. Mit der gleichen Apparatur werden Signallampen betätigt, an denen der Schaltwärter jederzeit sieht, welche Öffnungen gerade Regulierimpulse erhalten.

5. Betriebserfahrungen

Die Erfahrungen mit dem Betrieb der Regulierungen sind gut. Das Personal kann den Apparaten vertrauen und sich auf die Überwachung derselben beschränken. Direkte Eingriffe in die Steuerung sind nur bei aussergewöhnlichen Betriebszuständen nötig sowie beim Übergang von Überfall- auf Wasserstandregulierung und umgekehrt am Stauwehr.

In der ersten Zeit zeigten sich speziell an den Hilfswehren einige Kinderkrankheiten, die aber nicht auf das gewählte Regulierprinzip zurückzuführen waren, sondern ihre Ursache hauptsächlich in mechanischen Mängeln hatten. Es zeigte sich, dass die folgenden, eigentlich selbstverständlichen, Forderungen unbedingt eingehalten werden müssen:

1. Der Antrieb aller Stellungsgeber hat ohne Spiel zu erfolgen. Dies ist besonders wichtig bei den Wehrstellungen, wo ein grosser Verstellbereich erfasst, aber bereits kleine Änderungen bemerkt werden müssen.
2. Die Antriebe von Widerstandsgebern müssen so ausgelegt sein, dass bei der maximalen Änderung der Stellung des gemessenen Organes auch der Geber ganz ausgesteuert wird;
3. Die Stellglieder müssen den Regulierbefehlen genau gehorchen, was bei motorischen Antrieben die Verwendung von Stoppmotoren voraussetzt;
4. Die Lieferung der Wehre und diejenigen der Regulierapparate erfolgt meist nicht durch die gleichen Firmen. Es ist deshalb wichtig, dass bereits beim Vertragsabschluss die verlangten Garantien gegenseitig genau abgemacht werden. Der Wehrkonstrukteur muss z. B. angeben, wie das Wehr bei allen möglichen Betriebsfällen den Regulierbefehlen gehorcht (Totzeit, Geschwindigkeit, Nachlauf). Der Lieferant der Regulierapparate garantiert die Genauigkeit der Erfassung der Wehr- und Wasserstände und diejenige der daraus gebildeten Steuerbefehle. Mit diesen Unterlagen und unter Berücksichtigung der Eigenschaften der gestauten Flußstrecke lassen sich wichtige Betriebsfälle durchrechnen, wie z. B. normale und aussergewöhnliche Änderungen der Wasserführung, Maschinenausfall usw. Dabei stellt es sich heraus, ob bei dem gewählten Reguliersystem das Wehr genügend rasch und doch stabil arbeitet und die Regulierbedingungen einhält.

Das Versagen der Wehrregulierung an einem grösseren Fluss könnte umfangreiche Schäden verursachen. Deshalb sind nur bewährte, robuste und für langen Dauerbetrieb geeignete Apparate für diesen Anwendungszweck gut genug.

Adresse des Autors:
E. Elmiger, Oberingenieur der Nordostschweizerischen Kraftwerke AG, Baden (AG).