Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 53 (1962)

Heft: 20

Artikel: Methoden für automatische Regelung von Stauwehranlagen

Autor: Leuenberger, G.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-916977

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: 29.12.2025

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

[3] *Dishal, M.:* Alignment and Adjustment of Synchronously Tuned Multiple-Resonant-Circuit Filters. Proc. IRE 39(1951)11, S. 1448...1455.
[4] *Green, E.:* Exact Amplitude Frequency Characteristics of Ladder Networks. Marconi Rev. 16(1953)108, S. 25...68.
[5] *Dishal, M.:* Concerning the Minimum Number of Resonators and the Minimum Unloaded-Resonator *Q* Needed in a Filter. Electr. Commun. 31(1954)4, S. 257...277.
[6] *Taub, J. J.* und *B. F. Bogner:* Design of Three-Resonator Dissipative Band-Pass Filters Having Minimum Insertion Loss. Proc. IRE 45(1957)5, S. 681...687.
[7] *Weinberg, L.:* Exact Ladder Network Design Using Low-*Q* Coils. Proc. IRE 46(1958)4, S. 739...750.
[8] *Fubini, E. G.* und *E. A. Guillemin:* Minimum Insertion Loss Filters. Proc. IRE 47(1959)1, S. 37...41.
[9] *Dishal, M.:* Gaussian-Response Filter Design. Electr. Commun. 36(1959)1, S. 3...26.

Adresse des Autors:
A. Zimmermann, Ingenieur, Autophon AG, Ziegelmattstrasse 1—13, Solothurn.

Methoden für automatische Regelung von Stauwehranlagen [1])

Von *G. Leuenberger,* Bern-Bümpliz

627.82—53

Mit dem Bau von Verstellwehren ergab sich zwangsläufig bald einmal auch der Wunsch und das Bedürfnis, die Stauwehre in Abhängigkeit der bestimmenden Komponenten zu regulieren.

Neben allerprimitivsten Hilfsmitteln — für die Handbetätigung — wurden aber auch schon früh Lösungen getroffen, die erlaubten, Stauwehre in gewissen Grenzen automatisch zu verstellen. Als Prototyp einer automatischen Wehrregulierung diene diejenige gemäss Fig. 1:

1. Jeder Schwimmerstellung entspricht eine bestimmte Wehrstellung. Bei grossem Wasseranfall arbeitet die Anlage mit erhöhtem, bei kleinen mit niedrigem Niveau.
2. Es wird, wie leicht ersichtlich, auf «Zufluss = Abfluss» reguliert, d. h. bei jedem beliebigen Wasserstand kann demnach ein stationärer Zustand eintreten.

Fig. 2 stellt eine analoge Regulierung (Folgeregler) dar, die im Gegensatz zu der rein mechanischen Funktion elektromagnetisch ist. Auch in diesem Falle erfolgt die Regulierung nach demselben Prinzip: Jedem Wasserstand entspricht wieder eine bestimmte Wehrstellung. Es wird somit ebenfalls auf «Zufluss = Abfluss» reguliert. Der Vorteil der elektromechanischen Lösung liegt darin, dass dem Steuergerät (*5* in Fig. 2) Handsteuerorgane zugeordnet werden können, die jederzeit ein manuelles Eingreifen in die Automatik ermöglichen. Bei der dargestellten Methode handelt es sich um eine typische Regulierung mit Rückführung. Es wird demnach nicht auf Konstanthaltung des Staues reguliert, denn jeder Regulierbefehl kann nur bei weiterem Zufahren der Tendenz um eine bestimmte Stufe erteilt werden. Wenn also ein Wehr beispielsweise in *n* Stufen für seinen vollen Bereich reguliert werden soll, sind dazu *n* Stufen Niveauveränderung notwendig. Setzt man einen konstanten Bezug von Nutzwassermenge (z. B. bei Grundlast) voraus, ergibt sich folgendes:

Bei kleinem Wasseranfall wird mit dem niedrigsten und bei grossem mit dem höchsten Wasserstand bzw. Gefälle gearbeitet. Ein Zustand, der ausgerechnet dem tatsächlich wünschenswerten nicht entspricht. Es ist erstaunlich, dass sich die erwähnte Methode eines unveränderten und anscheinend anhaltenden Zuspruchs erfreut. Dies umsomehr, als die Praxis bei Handregelungen mit geringen Ausnahmen, die ja bekanntlich die Regel bestätigen, mit maximalem und konstantem Stau zu arbeiten trachtet. So sind z. B. Fälle bekannt, bei denen sich eifrige Maschinisten (bzw. Schichtführer) eine Ehre daraus machen, den Stau streng auf einer horizontalen Geraden zu halten. Natürlich können die Verhältnisse und Bedingungen von Fall zu Fall sehr unterschiedlich sein und man darf selbstverständlich nicht ohne weiteres verallgemeinern. Ein Regelkreis ist ja, gemäss der Theorie, immer eine Einheit und nur im Blick auf die Bedeutung aller Eigenschaften dieser Einheit soll man an die Arbeit herangehen. Die Tatsache jedoch bleibt bestehen, dass eine Methode, die erlaubt in der überwiegenden Anzahl der Fälle immer mit dem maximalen Gefälle zu arbeiten,

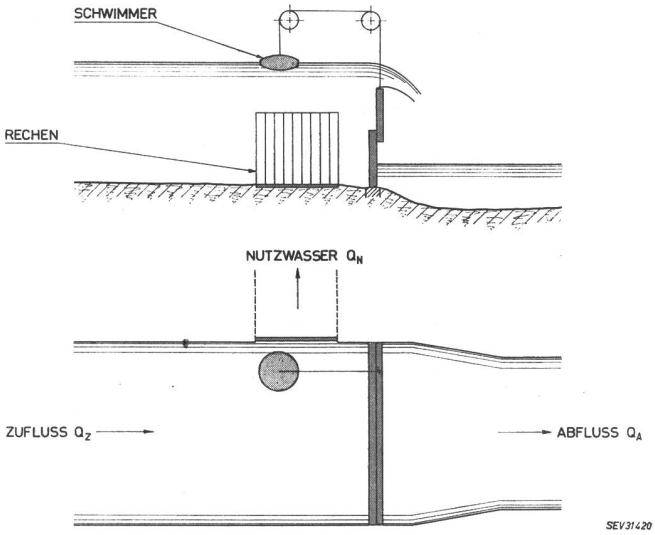


Fig. 1
Wehrregulierung mit direktem Antrieb durch Schwimmer
$Q_Z = Q_N + Q_A$

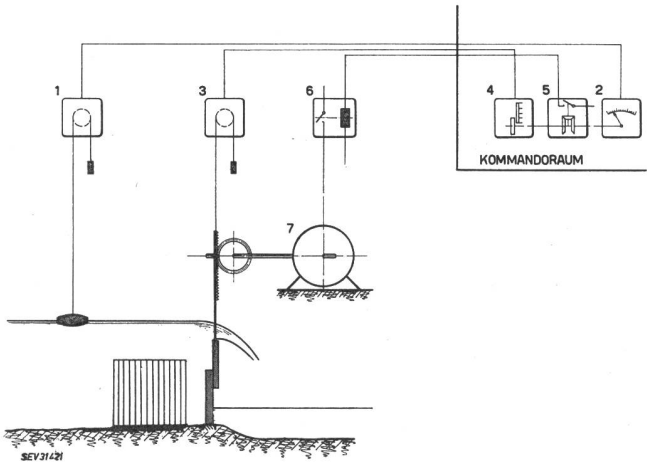


Fig. 2
Wehrregulierung mit elektrischem Folgeregler
1 Geber Wasserstand; *2* Empfänger Wasserstand; *3* Geber Schützenstellung; *4* Empfänger Schützenstellung; *5* Steuergerät; *6* Schaltschütz; *7* Verstellmotor

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

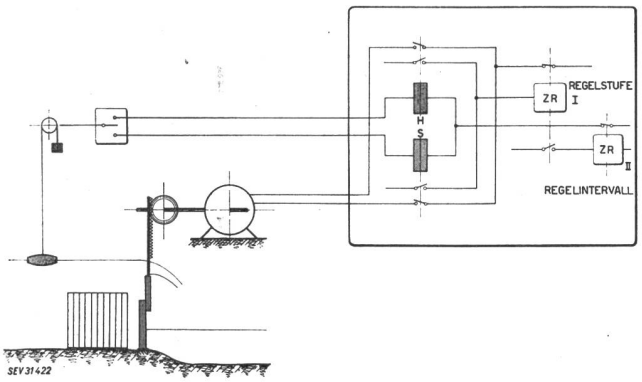


Fig. 3
Wehrregulierung mit Festwertregler
H Hebenrelais; *S* Senkrelais

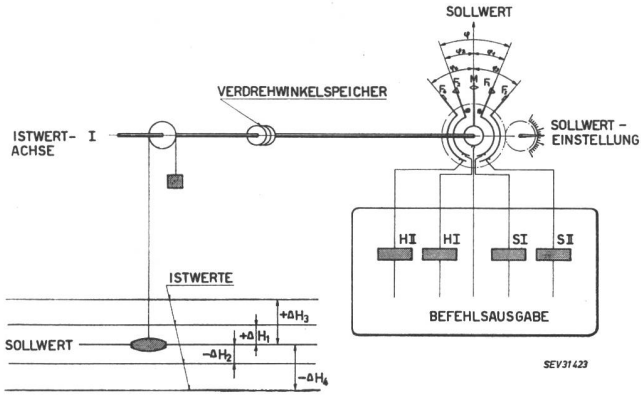


Fig. 4
Prinzipschaltung der Wehrregulierung mit Festwertregler
HI; HII Hebenrelais; *SI; SII* Senkrelais

sicher vorzuziehen und anzustreben ist. Da die Automatik als derjenige Teil der Technik bezeichnet wird, bei welchem das Eingreifen des Menschen sowohl körperlich wie informatorisch nicht mehr nötig ist, müssen also mit der Automatik auch bezüglich der Wehrregulierungen Lösungen getroffen werden, die wie der Mensch regulieren.

Fig. 3 zeigt das Grundprinzip einer Anlage, die starr auf Konstanthaltung des Staupegels reguliert (Festwertregler). Im Gegensatz zur vorbesprochenen Methode (Folgeregler) besteht hier kein unmittelbarer Zusammenhang mehr zwischen Wasserstand und Wehrstellung.

Im Prinzip funktioniert die Apparatur folgendermassen: Der Mittelkontakt (das Stellglied) des Regulierkontaktgebers berührt durch die Bewegung des Schwimmers (bei Abweichung vom Sollwert) die Kontaktgabel und erregt die entsprechenden Steuerrelais «Heben» oder «Senken». Diese erteilen ihrerseits dem Verstellmotor des Wehres den entsprechenden Steuerbefehl. Gleichzeitig mit dem Ansprechen der Steuerrelais erregt sich das einstellbare Laufzeitrelais, dessen Einstellzeit die Grösse der Regelstufe begrenzt. Das Wehr verstellt sich somit um die vorgewählte Stufengrösse. Mit dem Ablauf der Regelstufe kommt das Sperrzeitrelais zur Wirkung, welches über das eingestellte Regelintervall das Aufschalten eines weiteren Verstellbefehls sperrt. Nach Ablauf des Intervalles wird die Steuerspannung wieder an den Regelkreis gelegt und damit auch die Ausgangslage wieder hergestellt. Ist das Stellglied noch in Kontaktberührung, erfolgt unmittelbar ein weiterer Verstellbefehl.

Das Wesen der Methode liegt im sinnvollen Aufeinanderabstimmen der typischen Eigenschaften der einzelnen Glieder, und es ist zum Verständnis der Wirkungsweise notwendig, die Merkmale herauszuschälen. Als erstes sei der Regulierkontaktgeber besprochen.

Fig. 4 zeigt schematisch den Aufbau (das Gerät selbst zeigt Fig. 7):

Auf der Istwert-Achse *I* ist konzentrisch und frei verstellbar die Sollwert-Einstellung angebracht. Bei Übereinstimmung der beiden Werte befindet sich der Fühler *M* zwischen den beiden Feinregulierkontakten *F1* und *F2*. *F1* begrenzt die Abweichung des Istwertes vom Sollwert nach oben. Bei Verstellung des Fühlers *M* und den $\sphericalangle \varphi 1$ d. h. bei Zunahme des Wasserstandes um die Grösse $+ \Delta H1$ erfolgt — wie bereits besprochen — die Verstellung des Wehres um eine Regelstufe. Analogie besteht beim Sinken um die voreingestellte Grösse $- \Delta H2$. Der Feinregulierbereich von $- \Delta H2$ bis $+ \Delta H1$ ist somit begrenzt durch die Entfernung zwischen den Kontakten *F1* und *F2* im $\sphericalangle \varphi$. Diese Einstellung ist so zu treffen, dass sie alle natürlichen normalen Veränderungen im Wasseranfall auszuregulieren vermag.

Es kann aber auch gelegentlich eine anomale Abweichung auftreten. So bei Vollastabschaltung oder Schwallabgabe durch Oberlieger. Ändert sich dabei der Sollwert beispielsweise um die Grösse $\Delta H3$ kommt der Fühler *M* (Stellglied) bei Verstellung um den $\sphericalangle \varphi 3$ über den federnd angeordneten Kontakt *F1* mit Kontakt *F3* in Berührung. Dadurch erfolgt die Verstellung des Wehres um eine Grobregelstufe, wobei die Grobregulierung unmittelbar bei Ablösung des Fein- vom Grobstufenkontakt abgeschaltet wird. Von diesem Moment an ist die Anlage in den Feinregulierbetrieb zurückgeführt.

Ein wesentlicher Vorzug der Methode liegt darin, dass sie unmittelbar «auf Tendenz» arbeitet. Eine Notwendigkeit, den Wasserstand um eine bestimmte Grösse pro Regulierstufe zu verändern, besteht nicht. Die Auswirkung muss lediglich so gross sein, dass ein Ablösen des Fühlerkontaktes *M* erfolgt. Dieser Umstand erlaubt, äusserst rasch und schonungsvoll zu wirken, so dass Pendelungen leicht vermieden werden können.

Zur Erzielung der Idealfunktion ist aber noch ein weiterer typischer Umstand von grosser Bedeutung: Nämlich die «Sunk- und Schwallbewegung» (Fig. 5). Diese tritt bei jeder mehr oder weniger brüsken Wehrbewegung auf und bietet sich als ein vorzügliches Hilfsmittel an. An Hand von Fig. 5 ist ersichtlich, welche

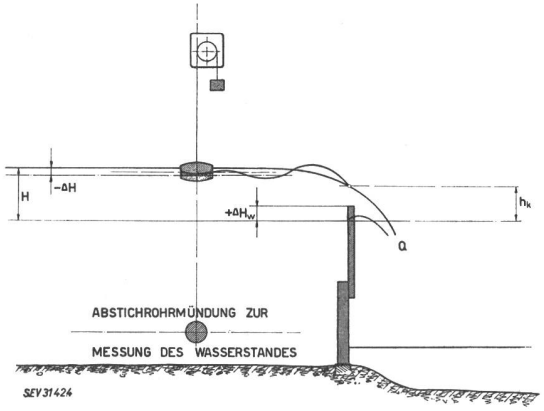


Fig. 5
Auswirkung des Sunk und Schwalles bei Wehrverstellung

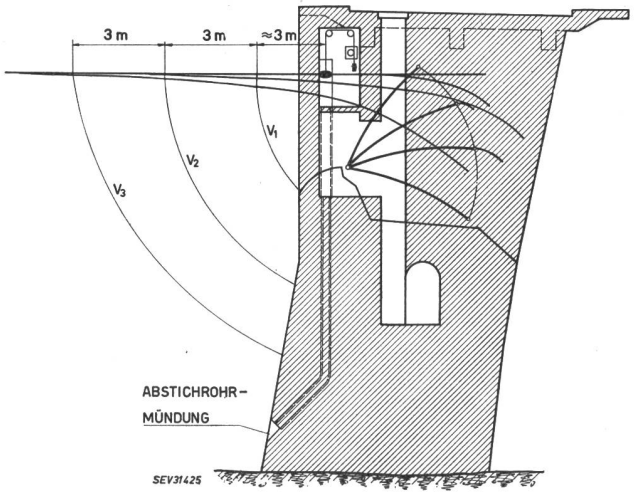


Fig. 6
Ansetzung der Abstichrohrmündung

erfreuliche Möglichkeit die örtliche «Sunk-Schwallwirkung» bei einer Wehrverstellung in sich birgt.

Mit dem Sinken des Wasserspiegels um den Betrag $-\Delta H$ erfolgt die Verschiebung des Wehres z. B. um den Wert $+\Delta H_w$. Die Grösse h_k nimmt verhältnismässig rasch ab, der Durchfluss Q vermindert sich ebenso, und es tritt dadurch flussaufwärts eine Schwallwelle auf, deren Grösse und Fortpflanzungsgeschwindigkeit sich ohne weiteres berechnen lässt.

Die Schwallwelle hat nun glücklicherweise die Eigenschaft, bei zweckmässiger Wahl des Kontaktgeberstandortes, bzw. der Mündung dessen Abstichrohres, (siehe Fig. 6) sofort eine Erhöhung des Pegels vorzutäuschen. Sie quittiert damit unmittelbar die Ausführung des Regelbefehles. Der Regelkreis wird dadurch gewissermassen mühelos überwacht.

Wie schon erwähnt, tritt mit dieser Quittierung die Zeitbegrenzung für das Regelintervall in Funktion, und sperrt für die vorgewählte Sperrzeit die Abgabe eines weiteren Regelbefehls. Bei zweckentsprechender Dimensionierung flacht während der Sperrzeit die Schwallwelle ab, die Abflussverminderung stabilisiert sich und der Wasserstand erfährt während der Sperrzeit die erforderliche Erhöhung zum gewollten Ablösen des Fühlerkontaktes. Genügt die Verstellung nach Ablauf derselben (d. h. des Regelintervalles) noch nicht, erfolgt sofort wieder ein neuer Regelimpuls.

Aus dem Gesagten ist klar ersichtlich, dass bei Regulierung nach der «Sunk-Schwallmethode» eine wichtige Rolle selbstverständlich auch der Einstellung der Laufzeit (Verstellgrösse) und der Sperrzeit (Regelintervall) zukommt.

Diese Tatsachen sind von Fall zu Fall den jeweiligen Verhältnissen anzupassen. Sie können an Ort und Stelle leicht eingestellt und feinreguliert werden. Bei richtiger Einstellung erlaubt die Methode, z. B. durch Festlegung kleiner Sperrzeiten, grössere natürliche Wasseranfälle rasch zu verarbeiten, bzw. ihnen rasch zu begegnen.

Die Methode eignet sich auch sehr gut zur Sunk- bzw. Schwallbekämpfung bei Teil- und Vollastabschaltungen in Flusskraftwerken. Unter der Voraussetzung, dass das Schwimmerrohr auf den Entstehungsbereich des Schwalls kommuniziert und das Wehr entsprechend ausgelegt ist, kann das Auftreten des Schwalles bei absolut normal wirkender Turbinenregulierung verhindert werden.

Fig. 6 zeigt Überfall-Krümmungsfäden, die drei verschiedenen Klappenstellungen entsprechen. Der Regulierkontaktgeber ist in einem Wehrpfeiler montiert, und die Kommunikationsröhren werden in den beiden mittleren Wehrpfeilern von den Abstichmündungen zum Schwimmerschacht geführt. Die Kreisbogen V_1, V_2 und V_3 deuten Linien linearen Druckverlaufes an. Daraus geht hervor, dass bei geeigneter Tiefenansetzung der Abstichrohrmündung das Wasser im Schwimmerschacht auf ein Niveau kommuniziert, das ausserhalb der Krümmungsfädenveränderungen durch variable Klappenstellung jedoch noch im Wirkungsbereich der durch die Regulierung vorübergehend veranlassten örtlichen Sunk- und Schwallwellen liegt.

Die genaue Berechnung der Sunk- und Schwallgeschwindigkeit sowie die Wellenhöhe kann nach *Favre* berechnet werden. Näher darauf einzutreten, würde den Rahmen des Themas sprengen. Es sei darauf hingewiesen, dass der bestimmende Faktor vor allem an ΔQ bzw. der Strömungsgeschwindigkeitsveränderung beim Bewegen des Wehres liegt. Bei langsam laufenden Wehren kann deshalb die Sunk- und Schwallbewegung sehr klein ausfallen. Es ist demnach notwendig, das Fühlergerät entsprechend auszubilden. Zur eingehenden Erklärung sei auf Fig. 4 hingewiesen, die schematisch den prinzipiellen Aufbau darstellt.

Fig. 7 zeigt die praktische Ausführung des Gerätes. Auf der Systemachse sind konzentrisch der Fühlerkon-

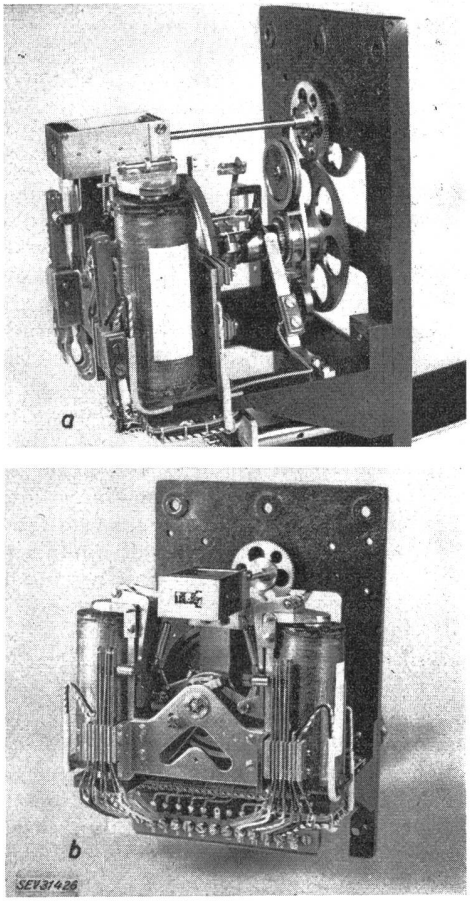


Fig. 7
Grob-Fein-Reguliergerät mit elektrischer Sollwerteinstellung
a Antrieb und Kontaktfühler; *b* Einstell-Schaltwerk

takt, die Feinregulierbereichkontakte und die Grenzwertkontakte angeordnet. Beide Systeme können in ihren Öffnungswinkeln unabhängig voneinander eingestellt werden. Die Kontakte sind auf einer Scheibe angeordnet, die entweder durch Drehknopf von Hand oder durch Schaltmagnete mit Klinkensystem elektrisch auf den Sollwert eingestellt werden. Wie bereits erwähnt, arbeitet das Gerät nur auf Kontaktberührung. Es ist deshalb in der Lage, auf feinste Veränderungen unmittelbar zu reagieren. Die überlagerte Sunk- oder Schwallbewegung wirkt sich deshalb sofort aus. In extremen Fällen besteht zudem die Möglichkeit, unmittelbar nach Abgabe eines Regelimpulses das Begrenzungskontaktwerk mittels des Schaltwerksystems um einen Schaltschritt zu verstellen und so den Fühler künstlich abzulösen, wenn die Sunk-Schwallhöhe zu gering ist. Die Schaltung ist dabei so gestaltet, dass nur ein einziger Verstellschritt erfolgt. Liegt der Kontakt nach Ablauf des Impulsintervalles noch oder bereits wieder an, fährt das Wehr, bis die Ablösung des Kontaktes hydraulisch, also vom Schwimmer her, erfolgt.

Die Zuordnung eines Schaltmagnetsystems erlaubt zudem, den Sollwert von einer zentralen Stelle aus je nach Bedarf von Hand oder automatisch einzustellen.

Der Vollständigkeit halber sei noch erwähnt, dass das Gerät, auch für Regulierungen nach der Methode Zufluss — Abfluss verwendet werden kann. Die Rückführung erfolgt in diesem Fall mit dem Schaltsystem, in dem bei jeder Kontaktberührung fortlaufend die elektromechanische Ablösung des Fühlerkontaktes eintritt. Wie früher erwähnt, bedarf es dabei immer einer weiteren Abgleitung des Wasserstandes, um einen neuen Regelimpuls auszulösen. Das Kontaktsystem bleibt dann bei jedem stationären Zustand auf dem erreichten Istwert stehen.

In den bisherigen Ausführungen wurden gewissermassen als selbstverständlich, motorangetriebene Wehrverschlüsse angenommen. In neuerer Zeit kommen aber mehr und mehr hydraulisch angetriebene Wehre in Anwendung. Dabei zeigt sich, dass eine zeitbegrenzte Regelstufengrösse nicht zweckdienlich ist, da die Laufgeschwindigkeiten der Wehre aus verschiedenen Gründen mehr oder weniger streuen. So sind u. a. die Temperatur und vor allem auch die Bewegungsrichtung der Wehre sowie die Auflast unter Umständen von wesentlichem Einfluss. Auch die Totzeit beim Wechseln der Bewegungsrichtung (der sog. Umkehrfehler) spielt eine Rolle. Diesen Störfaktoren könnte z. B. mit elektronischen Zeitrelais automatisch begegnet werden. Wollte man aber alle Faktoren berücksichtigen, würde die Anlage zu kompliziert. Man greift deshalb zu einem einfachen Mittel, nämlich zur direkten Überwachung der Wehrbewegung. Dies geschieht durch Wehrstellungsmeldung mit Hilfe von Indikatoren.

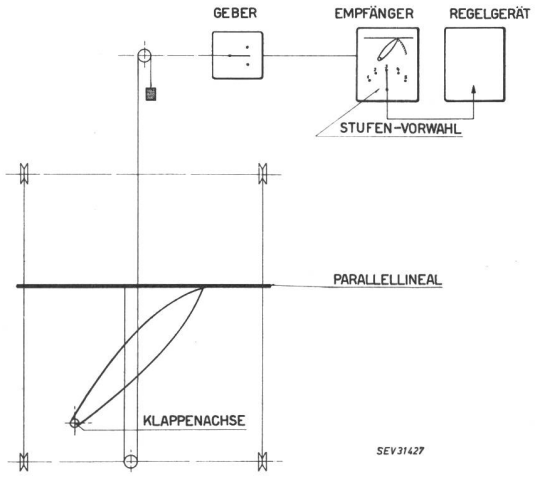


Fig. 8
Prinzip eines Stellungsindikators für Klappenoberkante

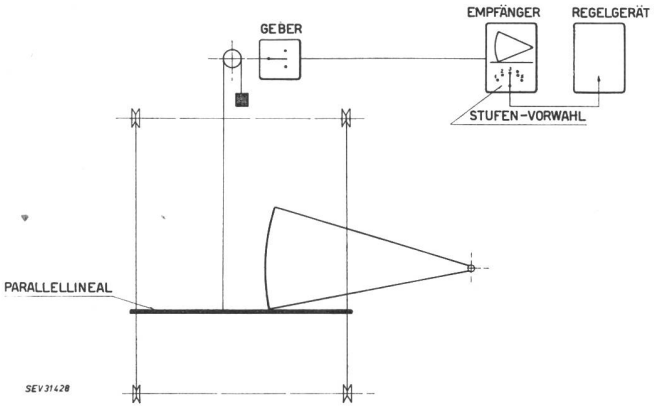


Fig. 9
Prinzip eines Stellungsindikators für Sektorunterkante

Auf der Wehrachse wird gemäss Fig. 8 ein in einem bestimmten Maßstab reduziertes mass- und formgetreues Abbild montiert. (Ein Ausführungsbeispiel aus der Praxis zeigt Fig. 11.) Dieses Abbild wirkt auf ein Parallellineal, dessen Bewegungen von einem Fernmeldegeber in üblicher Weise auf einen Empfänger übertragen werden. Der Empfänger ist zum Zwecke der Regulierung mit einem Stufenvorwahlschalter ausgerüstet. Dieser wird entsprechend der gewünschten Regelstufe des Wehres z. B. auf 1, 2, 3 usw. Zentimeter Wehrkronenbewegung eingestellt. Mit der Abgabe eines Regelimpulses erfolgt die Verstellung des Wehres immer um den voreingestellten Betrag. Bei Erreichen desselben spricht die besprochene Impulsintervall-Begrenzung an, und es spielen sich analog alle Funktionen wie erläutert ab.

Das Parallellineal wird oft auch Sinuslineal genannt, weil es die Sinusfunktion der Wehrkronenhöhe zur Drehwinkellage der Regulierklappe erfasst. Dieser Umstand an sich spricht gegen eine feste Laufzeitbegrenzung pro Regelstufe, weil diese, je nach Klappenlage, immer eine andere Verschiebung der Wehrkronenhöhe ergeben würde.

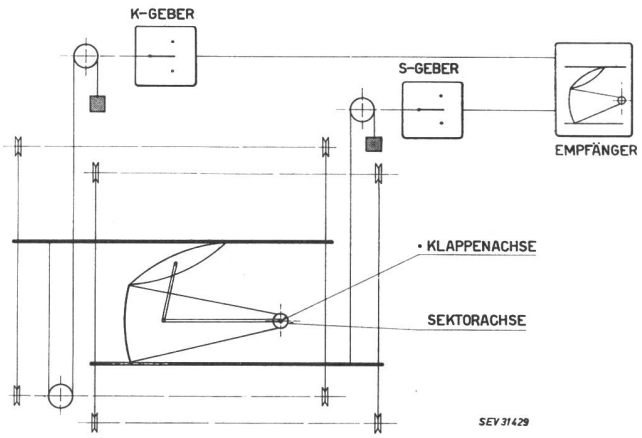
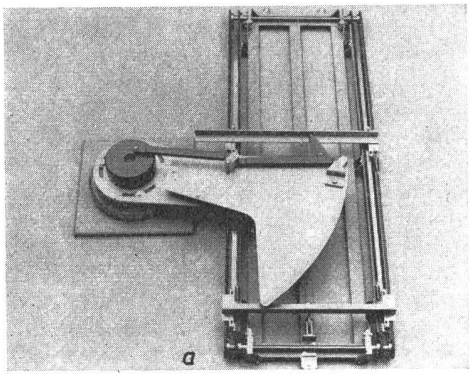
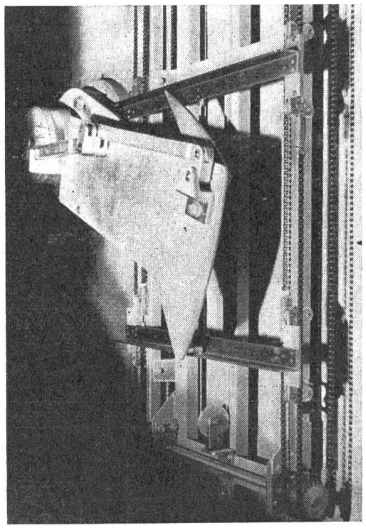


Fig. 10
Prinzip eines kombinierten Stellungsindikators

Neben der besprochenen Regulierung durch Überfall kommen häufig auch solche mit Unterströmung, d. h. durch Grundablass gemäss Fig. 9 vor. Hier gilt bezüglich der Sektorenschützen dasselbe wie für die Klappen, wobei die Bewegung, bzw. die Öffnung des Sektors wieder mit einem Sinuslineal zu erfassen ist.

Die beiden Methoden, Überfall- oder Grundablassregulierung, werden vielfach auch kombiniert (Fig. 10), wobei die Klappenbewegung durch ein Gestänge konzentrisch auf die Sektorachse geführt wird. Das maßstäblich reduzierte Abbild (ein Ausführungsbeispiel zeigt Fig. 11) wirkt dann gleichzeitig auf zwei Sinuslineale, deren Verschiebungen in umgekehrtem Sinne im Empfangsapparat zusammenspielen. Entsprechend sind in solchen Fällen auch die Regelbedingungen zu bestimmen, bzw. die Geräte auszulegen. Der Kombinationen sind hier mannigfache. Vor allem wird die Sache sehr interessant, wenn bei einem Bauwerk mehrere Wehrverschlüsse existieren. Hier treten alle die Probleme auf, wie sie der Fachmann kennt: So die Parallelregelung mehrerer Klappen miteinander oder die Nachlaufregulierung, wo sämtliche Klappen in gewissen Stufen abwechslungs- oder zyklusweise nacheinander betätigt werden. Im weiteren muss auch mit der Wechselregulierung z. B. bei Hochwasser mit einem Übergang von Klappen- auf Sektorregulierung gerechnet werden.





b

Fig. 11
Ausführungsbeispiel eines kombinierten Stellungsindikators
a Modell; *b* Ausführung im Kraftwerk Reichenau

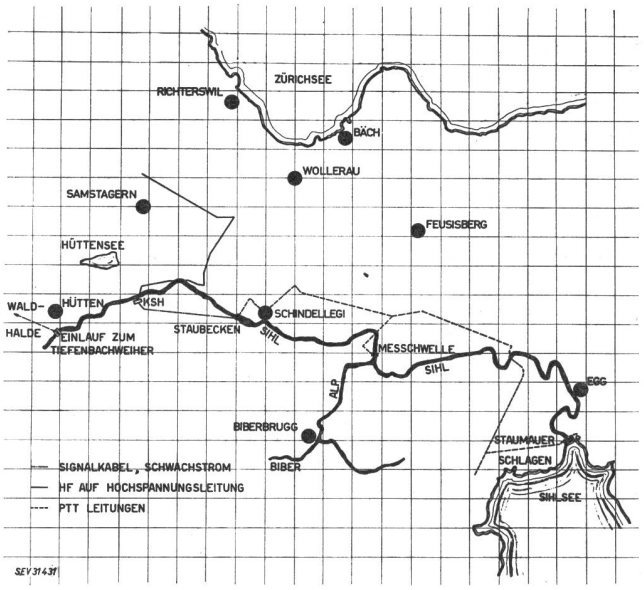


Fig. 12
Geographische Situation des Kraftwerkes Sihl-Höfe

Bei Regime-Regulierung kann z. B. gleichzeitig die Klappe auf konstante Überfallhöhe und der Sektor auf Konstanthaltung des Wasserstandes regulieren. Hiezu kommen unter Umständen auch die jahreszeitlich bedingten Regulierungen nach Wehrreglement und Stauinhalt.

Ein typisches Beispiel dieser Kategorie ist die Wehrregulierung des Kraftwerkes Sihl – Höfe (KSH). Fig. 12 zeigt die geographische Situation: Unmittelbar nach der Alpmündung befindet sich die Meßschwelle und bei Schindellegi das Regulierwehr mit Staubecken. Die Konzession ist erteilt für eine minimale Durchflussmenge Q_z von 2,4 m³/s. Ist der natürliche Zufluss, Alp – Biber, kleiner als 2,4 hat Dotierung in die Sihl aus dem Sihlsee zu erfolgen.

Unterhalb des KSH folgt das Kraftwerk Waldhalde der EKZ. Es spielen also hier die verschiedensten Interessen mit, weshalb zur Regelung des Staubeckens Schindellegi ein verbindliches Wehr-Reglement aufzustellen war.

In Fig. 13 ist dieses Reglement graphisch dargestellt. Bis zur maximalen Schluckfähigkeit der Turbinen (4 m³/s) wird der Stau mit Turbinenregulierung gehalten, wobei die Regulierklappen des Wehres in

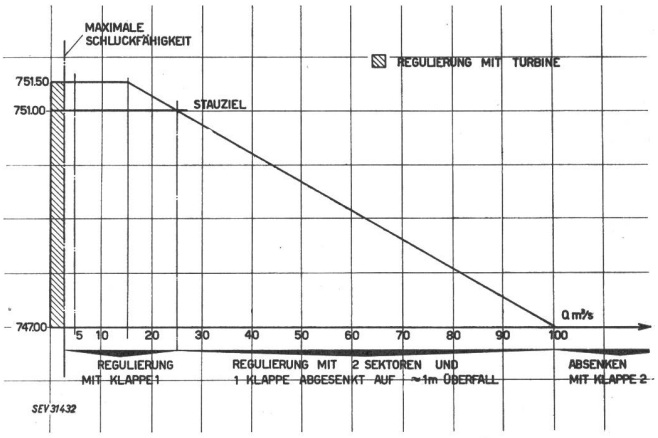


Fig. 13
Wehrreglement zur Regulierung des Staubeckens Schindellegi

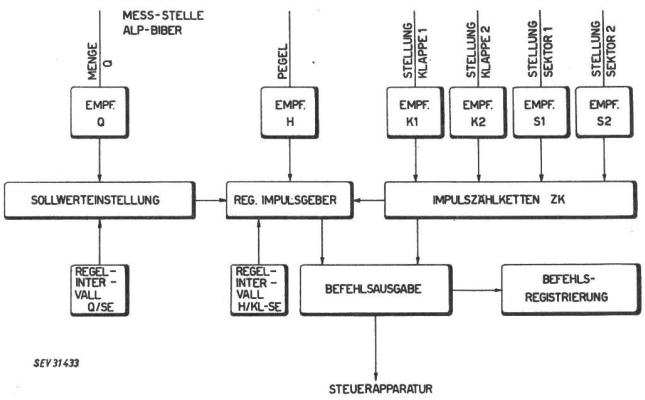


Fig. 14
Blockschema der Wehrsteuerautomatik KSH

einer vorbestimmten Stellung stehen. Diese Stellung ist so festgelegt, dass beim Übergang von Turbinen- auf Wehr-Regulierung über den Bereich von 4...15 m^3/s der Normalstau mit normaler Regelung, wie besprochen (Grob – Feinregulierung), eingehalten werden kann. Ab 15 bis etwa 100 m^3/s muss der Sollwert kontinuierlich gesenkt werden. Dies geschieht mit einer separaten Sollwertverstellung, die wie eine normale Regulierung in Abhängigkeit von Q_z den Sollwert entsprechend einstellt, auf welchen dann die Niveauregelung durch Sektor (Grundablass) — Verstellung normal arbeitet. Ab $Q_z = 15$ sind somit zwei Regelungen in Serie geschaltet.

Fig. 14 zeigt das Blockschema der Wehrsteuerautomatik. Der Empfänger für die Durchflussmenge Q_z wirkt auf die Sollwerteinstellung, die ihrerseits den Regulierimpulsgeber beeinflusst. In gleicher Weise wirkt auf dieses Gerät ebenfalls der Empfänger des Staupegels. Der Mischwert veranlasst die Befehlsausgabe, die von der Ausführungsüberwachung (Empfänger der Stellungsfernmeldungen *K1/K2* bzw. *S1/S2* mit Bewegungs-Impulszählketten *ZK*) quittiert wird.

Eine Komplikation ergibt im Falle des KSH die Bedingung, dass beim natürlichen Zufluss von $Q_z < 2{,}5$ aus dem Sihlsee (Etzelwerk), die fehlende Dotierwassermenge abzugeben ist. Dies bedingt die Kenntnis von Q_z beim Stauwehr Schlagen — Sihlsee. Im übrigen ist es wünschenswert, dass dort (in Schlagen) auch der Pegel des Staubeckens Schindellegi bzw. dessen Inhalt angezeigt wird. Die Kenntnis dieses erlaubt den Dringlichkeitsgrad des Dotiereinsatzes zu beurteilen. Bei näherer Überlegung und Abwägung der gegenseitigen Interessen wird es klar, dass die Abrechnung über die Dotierwassermenge automatisch erfolgen sollte. In diese Rechnung sind Dotieranfang und -ende, Fluss- und Seeinhalte und ebenfalls derjenige des Tiefenbachweihers vom Unterliegerkraftwerk Waldhalde der EKZ, mit einzubeziehen. Bei der Integrierung spielen ebenfalls die Fliesszeiten Schlagen — Meßschwelle — Alp, Alp — Stausee Schindellegi und Maschinenhaus des KSH — Maschinenhaus Waldhalle eine Rolle, die zu berücksichtigen wären. Es liegen entsprechende Vorschläge zur Realisierung des Problemes vor, und es wäre sehr interessant, näher auch auf diese Angelegenheit eintreten zu können.

Kritisch wird es in unserem föderalistischen Land, wenn kantonale Interessen ineinanderspielen, und wenn noch die Forderungen des Naturschutzes und der Fischerei, eventuell auch der Schiffahrt und von Uferanstössern usw. miteinbezogen werden müssen. Dies alles führt vorweg zu zahlreichen Konferenzen am grünen Tisch, und der Regelfachmann hat hernach den dabei aufgestellten Forderungen zu entsprechen. Mit dem nötigen Ernst muss auch an die Fälle herangegangen werden, wo es um See- und Flussregulierungen geht, die von zwischenstaatlicher Bedeutung sind, wie z. B. die Regulierung der Grenzseen wie Boden-, Genfer-, Luganer- und Langensee und ihrer Zuflüsse.

Mit diesen Aufzählungen kommt man in Gefahr, sich vom eigentlichen Thema abzuwenden. Es ist deshalb angezeigt, wieder den festen Boden der technischen Details zu betreten. Man möge sich erinnern, dass zuletzt die Rede von den verschiedenen Kombinationsmöglichkeiten war. In zahlreichen Fällen kommt man nicht damit aus, nur die unmittelbar bei den Stauwehren bestehenden Faktoren zu erfassen. Oft werden die Regulierungen durch weitentfernt liegende Zustände beeinflusst. So spielen öfters die natürlichen Zuflussgrössen eine wesentliche Rolle und es wird deshalb notwendig, zu jeder Zeit Kenntnis von den entsprechenden Verhältnissen zu haben.

So war es beispielsweise während des letzten Weltkrieges für unser Land lebenswichtig, die natürlichen Seen als Energiespeicher zum Nutzen der gesamten Volkswirtschaft voll und ganz heranzuziehen. Besondere Bedeutung fiel dabei u. a. der Regulierung des Bieler- und Neuenburgersees mit dem Stauwehr in Nidau und des Genfersees mit dem Regulierungswehr in Genf zu. Obschon die Regulierung der beiden genannten Wehre heute noch manuell erfolgt, erscheint es wichtig, wenigstens kurz auf die betreffenden Informationsfernmeldeanlagen einzutreten.

Fig. 15 zeigt den prinzipiellen Aufbau der Fernmeldeanlage, die vom Bureau für Wassernutzung Bern in Verwirklichung der Juragewässerkorrektion im Jahre 1939 in Auftrag gegeben wurde. Der erwähnten Behörde wurde dadurch ermöglicht, von ihrem Bureau in Bern aus die reglementierte Regulierung des Bieler- und damit auch des Neuenburgersees zentral zu lenken und zu überwachen. In Fig. 15 sind der Übersichtlichkeit wegen die internen Anzeige- und Kontrollapparate im Kommandoraum auf der Wehrbrücke bei den Windwerken weggelassen.

Die Geberapparate sämtlicher Pegelstationen sind über separate Kabel mit den zugehörigen Fernsendern (untergebracht möglichst in der Nähe der Geberstel-

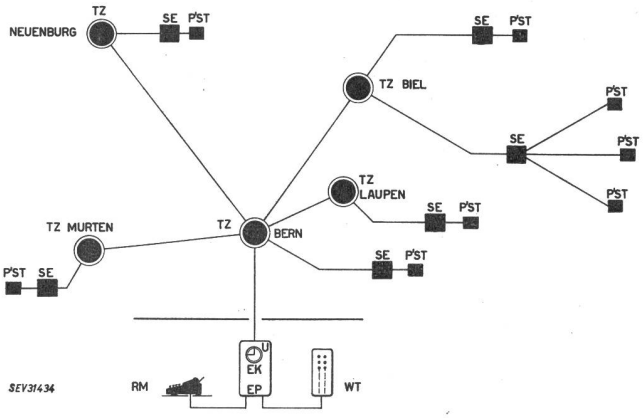


Fig. 15
Blockschema der Fernmeldeanlagen des Bureaus für Wassernutzung, Bern
P'ST Pegelstation; *SE* Sender; *EP* Empfänger; *TZ* Telephonzentrale; *RM* Registriermaschine; *WT* Wahltableau; *U* Weckeruhr; *EK* elektrischer Kalender

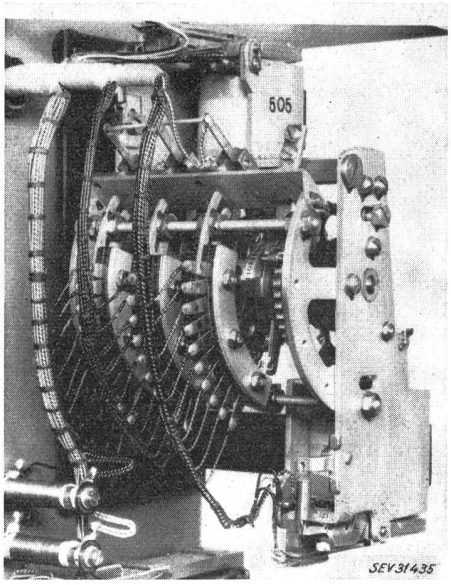


Fig. 16
Dekaden-Kontaktwerk

len) verbunden. Die eigentlichen Empfangsorgane sind dabei die Dekadenwerke nach Fig. 16. Diese stellen sich fortlaufend entsprechend den Wasserstandsveränderungen ein und markieren elektrisch auf Kontaktbogen, ähnlich gewöhnlichen mechanischen Rollenzählwerken, in 1er, 10er und 100er Ziffern die Momentanwerte. Mit 3 Dekaden kann somit jede Zahl von 000... 999 eindeutig festgehalten werden, was im vorliegenden Fall bei einer Stufengrösse von 1 + 1 cm einen Messbereich von 10 m Niveaudifferenz ergibt.

Die Fernsender *SE* (Fig. 15) sind wie die üblichen Telephonapparate als Teilnehmer mit eigener Rufnummer an die nächstgelegene Ortstelephonzentrale angeschlossen. Die Sender sind prinzipiell alle gleich ausgeführt. Eine Ausnahme macht lediglich derjenige im Stauwehr Nidau selbst, da mit diesem 3 Werte, nämlich «Wehr Oberwasser», «Wehr Unterwasser» und Pegelstation «Aare — Brügg» übermittelt werden. Der Empfänger *EP*, welcher auf total 20 Senderanschlüsse ausbaufähig ist, befindet sich im Bureau für Wassernutzung in Bern. Er besteht aus zwei Hauptteilen: dem eigentlichen Anwahl- und Auswerte-Apparatekasten *EP* und der Registriermaschine *RM* (siehe Fig. 17), welcher ein Wähltastertableau zur Einzel- oder Gesamteinholung der Wasserstände sowie ein elektrischer Kalender *EK*, (zur Eintragung der genauen Zeitangabe: Minute, Stunde, Tag, Monat und Jahr) zugeordnet sind. Der Kalender ist gebaut für einen Zeitraum von 25 Jahren. (Er muss demnächst umrangiert werden, da sein Wirkungsbereich im Jahre 1965 abgelaufen sein wird.) Die Einstellung erfolgt schrittweise und vollautomatisch durch Minutenimpulse aus einer kleinen Mutteruhr unter selbständiger Berücksichtigung der Schaltjahre.

Die Einholung der Wasserstände (siehe Fig. 15) erfolgt in der Regel einmal täglich vollautomatisch sowie einzeln nach Bedarf. Sie geht im Prinzip folgendermassen vor sich: Bei Erreichen der am elektrischen Kalender eingestellten Auslösezeit, z. B. 07.30 morgens, werden nacheinander alle Sender mittels eines Wahlimpulsgebers auf genau gleiche Weise wie beim Herstellen einer normalen Telephonverbindung angerufen. Auf den Anrufstrom sprechen jeweils die Sender auf der Gegenseite an und geben im Anschluss an die Zeit- und Datummarkierung (durch den elektrischen Kalender) ihre Kennziffer und danach entsprechend der Einstellung der Dekadenwerke die Wasserstandsmarkierungs-Tonfrequenzimpulse auf die Leitung. Der Empfänger in Bern verarbeitet die Impulse und leitet sie auf die entsprechenden Typenhebelmagnete der elektrischen Schreibmaschine.

Zur Regulierung des Genfersees benötigte auch der Kanton Genf eine Informationsanlage, die im Jahre 1944 gebaut wurde (Fig. 18). Da dem Genfersee ausser der Rhone nur kleine Gewässer zufliessen, galt es in erster Linie, sich in Genf jederzeit über die Wasserführung der Rhone bei der Mündung in den Genfersee orientieren zu können. Zu diesem Zwecke wurde eine Fernmeldeanlage erstellt, die den Wasserstand der Rhone bei der Pegelstation Porte du Scex nach Genf übermittelt. Da die Rhone bekannterweise ein unruhiger Fluss ist, ist es wichtig, nicht nur den Wasserstand an sich, sondern auch dessen Tendenz zu kennen. Es wurde deshalb notwendig, neben der Markierung des Wasserstandes zusätzlich auch rückwirkend die Kurve des Wasserstandsverlaufes zu übermitteln.

Die Anlage wurde so entwickelt, dass sie gestattet, innerhalb einer drei-Minuten-Telephonverbindung über eine Distanz von mehr als 200 km im Empfänger in Genf den Wasserstandverlauf seit dem letzten Anruf des Senders aufzuzeichnen. Dies konnte mittels Spezialmagnet-Speicherringen verwirklicht werden

Fig. 17
Elektrische Registriermaschine mit Abfragetastertableau

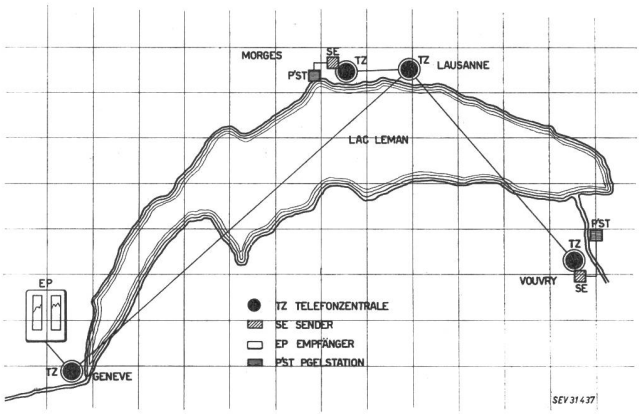


Fig. 18
Situation der Fernmeldeanlagen Rhone-Porte du Scex und Genfersee-Morges

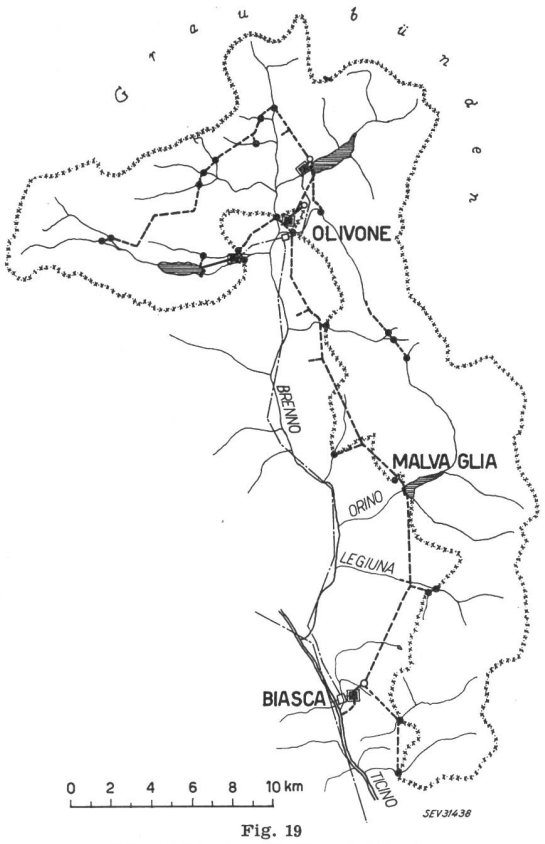


Fig. 19
Übersichtsplan Kraftwerk Blenio

Maschinenhaus — Schaltstation
Wasserfassung — Staumauer, Staubecken
x-x-x-x Einzugsgebiet-Grenze

unter gleichzeitiger Verwendung eines Dekadenkontaktwerkes, das bereits erwähnt wurde.

Wie im Falle des Kantons Bern erfolgt der Anruf der Pegelstation Porte du Scex ebenfalls automatisch (in der Regel in Zwischenräumen von 8 h). Vorgängig der Durchgabe des momentanen Wasserstandes werden jedoch noch die Magnetspeicher abgetastet und damit der Pegelverlauf während der zwischen zwei Anrufen verstrichenen Zeit auf einem normalen Trommelregistrierempfänger mit elektrischem Zeitvorschub aufgezeichnet. Die Aufzeichnungen werden wieder durch Tonfrequenzimpulse gesteuert. Gearbeitet wird mit 3 Frequenzen und zwar je eine für die Bewegungsrichtungen + (aufwärts) und — (abwärts), sowie der dritten zur Markierung des Zeitvorschubes.

Das Kriterium zur Ausscheidung der entsprechenden Sendefrequenzen besteht in polarisierten magnetischen Markierungen, deren Abgriff durch permanent magnetisch polarisierte Wendekontakte erfolgt. Die Anlage ist im übrigen so ausgelegt, dass der Sender von jedem beliebigen Telephonanschluss aus zur Abgabe der Wasserstandmeldung angerufen werden kann. In diesen Fällen wird nur der Wasserstand in den den Ziffern entsprechenden Tonimpulsreihen gesendet, so dass er im Hörer durch Zählen der Impulse leicht mit dem Gehör aufgenommen werden kann. Dabei darf selbstverständlich der Ablauf der rückwirkenden Registrierung nicht erfolgen. Dieser Vorgang kann nur vom Empfänger aus in Genf bewirkt werden. Der Empfänger sendet zu diesem Zwecke nach Aufbau der Verbindung seinerseits Befehlsimpulse zur Freigabe des Senders.

Neben der erwähnten Anlage zur Abfrage des Pegelstandes Porte du Scex hat der Kanton Genf noch eine analoge Anlage zur Übermittlung des Genfersee-Wasserstandes, gemessen in der Pegelstation Morges, installiert. Entsprechend der grossen Bedeutung des Wasserinhaltes wird hier in Stufen von 1 : 1-mm-Niveauänderungen gearbeitet.

Ähnliche Anlagen schaffte zusätzlich auch das Eidg. Amt für Wasserwirtschaft an. So wurden bis heute die Pegelstationen Rhone—Sion, Aare—Murgenthal und Thur—Mühlau mit Sendern nach dem System der Tonimpulsserien ausgerüstet. Diese Sender werden zur Zeit je nach Bedarf, jedoch mindestens einmal täglich angerufen und mit dem Gehör abgenommen. Die Sendeapparate sind aber so gebaut, dass sie ohne weiteres auch zur Übertragung des Wasserstandes, mit oder ohne rückwirkende Aufzeichnung auf einem Zentralempfänger (z. B. im Amt Bern), ausgebaut werden können.

Von grosser Bedeutung ist die Kenntnis der Zuflüsse selbstverständlich auch bei bestimmten Kraftwerken (Fig. 19). Das Kraftwerk Blenio sammelt z. B. in seinem Einzugsgebiet in 12 Wasserfassungen seine natürlichen Zuflüsse. Dabei sind zwei Gruppen zu unterscheiden und zwar: die Gruppe derjenigen, die den Stausee Malvaglia speisen und diejenigen, welche sich in unmittelbarer Umgebung des Kraftwerkes Biasca befinden und dem Maschinenhaus direkt zugeleitet werden. Jede der einzelnen Fassungen ist mit einer örtlichen, hydraulisch-automatischen Wehrregulierung ausgerüstet, deren Sollwert mit Fernsteuerung

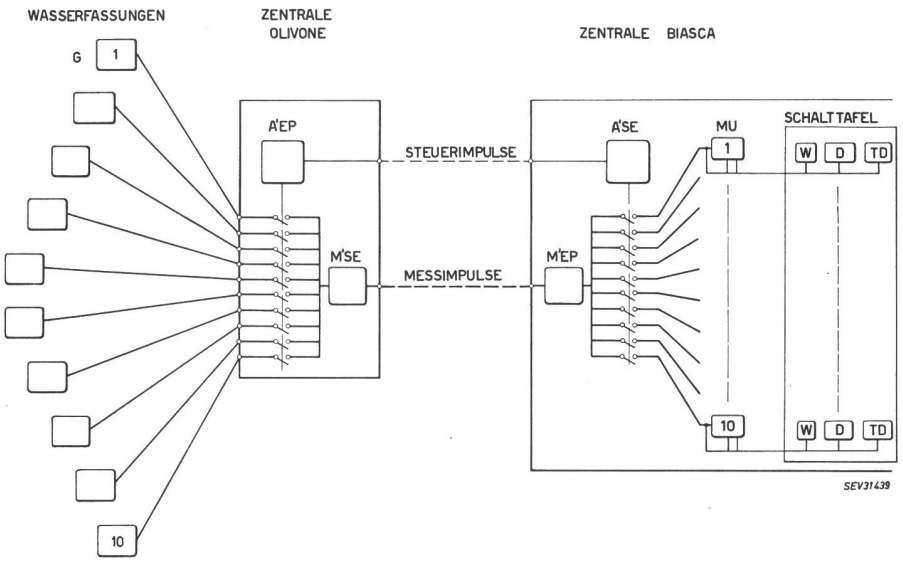


Fig. 20
Blockschema der Fernmessanlage Kraftwerk Blenio
G Geber; *MU* Magnetumrechnungen; *A'SE/A'EP* Aufschalt-Sender/Empfänger; *M'SE/M'EP* Mess-Sender/Empfänger; *W* Wasserstand (in cm); *D* Durchflussmenge (in m³/s); *TD* Total-Durchfluss (in m³)

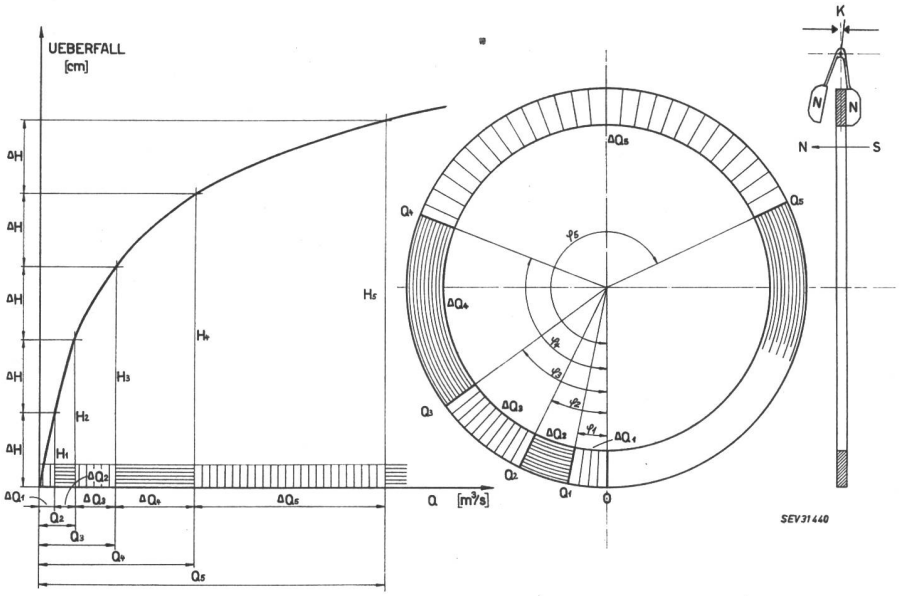


Fig. 21
Prinzip eines Magnetspeichers

von Biasca aus verändert werden kann. Den schematischen Aufbau stellt Fig. 20 dar.

Zum Betrieb des Kraftwerkes ist es erforderlich von jeder Fassung, sowohl die dem System zufliessende Nutzwassermenge, wie auch die nicht genützte zu kennen. Die Bestimmung erfolgt durch Überfallmessungen. Zu diesem Zwecke werden alle Überfallhöhen in üblicher Weise in die Zentrale ferngemeldet und hier entsprechend ihrer spezifischen Überfallkurven in Wassermengen umgerechnet. Dies geschieht mittels Magnetspeichern, deren Prinzip an Hand von Fig. 21 kurz besprochen sei.

Auf einen Magnetspeicher werden in den, den Meldestufen entsprechenden Grössen abwechselnd polarisierte Magnetzonen aufmagnetisiert. Mit dem Eintreffen der Meldestufe ΔH (Veränderung des Überfalles auf die Grösse H_1) beginnt der Magnetring von 0 aus um den $\sphericalangle\ \varphi_1$ zu laufen. Mit dem Erreichen der zweiten Zone legt die Tastnadel K um und stoppt den Lauf des Magnetringes. Der Ring ist somit ensprechend dem Wert Q_1 ausgedreht. Trifft nun ein weiterer Impuls der Zunahme des Überfalles um ΔH auf den Wert H_2 ein, überläuft der Magnetspeicher die zweite Zone um den Wert ΔQ_2 bis zum Kippen der Tastnadel K. In gleicher Weise vergrössert sich entsprechend der Anzahl ΔH-Impulsen der Drehwinkel auf die Werte Q_3 bzw. Q_4 usw. In jedem Moment des Stillstandes entspricht also der ausgedrehte $\sphericalangle$ der Wassermengenführung des Überfalls. Analog verläuft die Magnetspeicherbewegung beim Sinken jeweils um die Werte $-\Delta H$ in entgegengesetzter Richtung bis zum Kippen der Tastnadel. Die Genauigkeit der Umrechnung ist abhängig von der Wahl der Meldestufen ΔH, bzw. der Anzahl Impulse über den vollen Messbereich des Überfalles. In der Praxis werden zu diesem Zwecke selbstverständlich mehrere Magnetspeicher in Reihe geschaltet, wie dies Fig. 22 zeigt.

Es ist ohne weiteres möglich, einen Überfallmessbereich wenn nötig, in mehrere hundert Impulse aufzulösen, wobei zur vollen Ausnützung der Ringe jeder folgende in einer fortschreitend reduzierten Drehwinkelübersetzung angetrieben wird. Wenn z. B. die Ringe einen magnetisierbaren Umfang von 300 mm aufweisen und drei Ringe im Reduktionsverhältnis 9 : 3 : 1 angetrieben werden, entspricht dies einer Abszisse von (9 + 3 + 1) × 300, also von total 3,9 m. Das Auflösungsvermögen kann somit praktisch sehr weit getrieben werden.

Im zitierten Falle des Kraftwerkes Blenio weist jeder der Umrechner mit seiner Ausdrehung die momentane Zuflussmenge auf. Dies ermöglicht die Addition der Drehwinkel und somit die Bildung der Summe aller Momentzuflussmengen. Durch Integrierung (in gewissen Zeitabständen) werden zudem fortlaufend alle Totalzuflussmengen gebildet. Gleichzeitig hat man dabei auch die Anzeige der dem System zugeflossenen Total-Wassermenge. Die beschriebene Umrechnung hat den Vorzug, dass sie bei veränderten Überfallsmesskurven (was beispielsweise bei Querschnittveränderungen durch Geschiebeanhäufungen der Fall ist) an zentraler Stelle entsprechend den Eichkurven leicht neu magnetisiert werden kann, was ohne irgendwelche mechanische Änderung an den Apparaten, möglich ist.

Bei den zuletzt erwähnten Fällen handelt es sich um hydraulisch natürliche und demnach relativ langsam verlaufende Vorgänge. Es besteht deshalb nicht ein unmittelbarer Zwang zur Automation. Es stehen jedoch diverse Anlagen im Studium, bei denen ein vollautomatischer Betrieb angestrebt wird. So liegt z. B. ein entsprechendes Projekt vor zur vollautomatischen Regulierung des Luganersees in Abhängigkeit von seinen Zuflüssen, vom Wasserstand, sowie von der Jahreszeit. Ein entsprechendes Reglement wurde bereits provisorisch ausgearbeitet und die Lösungen für die automatische Regulierung wurden studiert. Dabei beabsichtigt man auch mit Speicherprogrammierung zu arbeiten, wobei an Stelle von Speicherringen mit direktem statischem Abgriff, Bandapparate oder Folien mit Tonmarkierung zur Anwendung kommen können. Die Tastung hätte in diesem Falle mittels Ton-

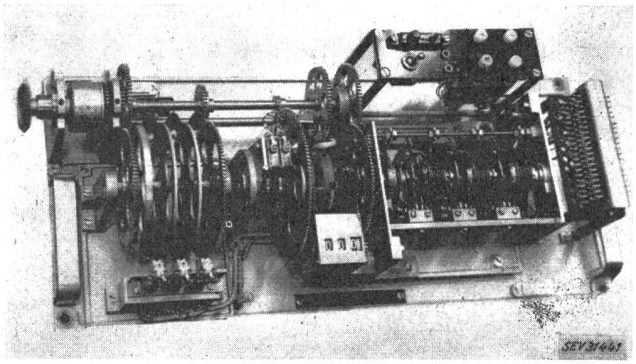


Fig. 22
Umrechnungseinheit mit mehrstufigem Magnetspeicher und Summier-Dekadenkontaktwerk

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:

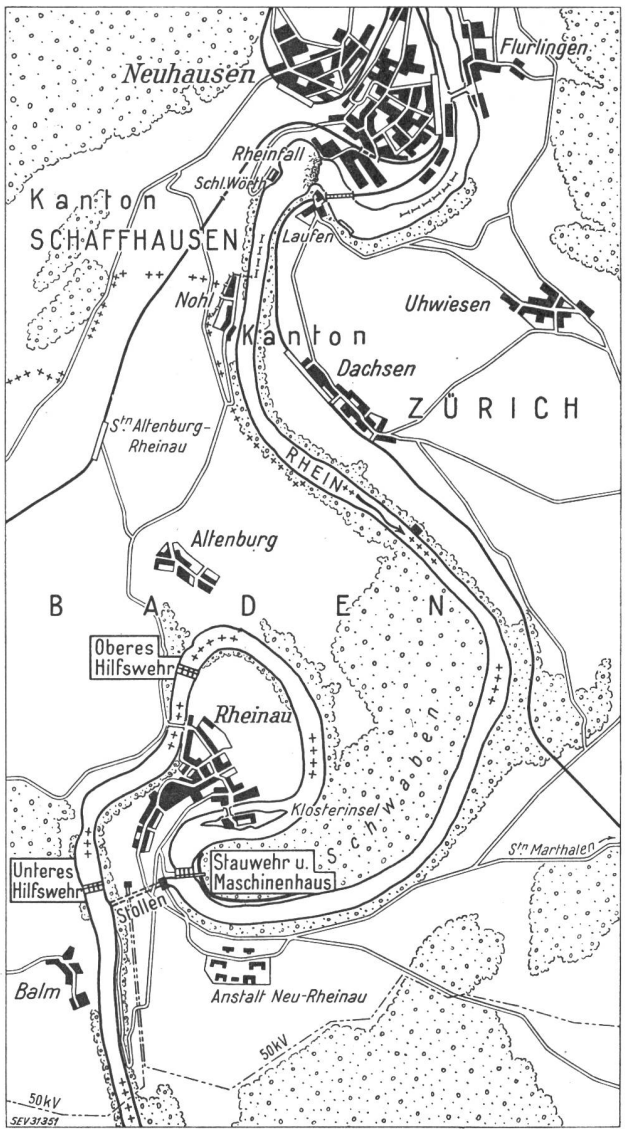


Fig. 1
Übersichtskarte des Konzessionsgebietes

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