Spiegelbewegung in Wasserschlössern

Autor(en): **Schoklitsch, Armin**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizerische Bauzeitung**

Band (Jahr): **81/82 (1923)**

Heft 11

PDF erstellt am: **21.09.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-38879

Band 81. Nachdruck von Text oder Abbildungen ist nur mit Zustimmung der Redaktion und nur mit genauer Quellenangabe gestattet. Nr. 11.

Spiegelbewegung in Wasserschlössern.

Von Privatdozent Dr. techn. Ing. *Armin Schoklitsch*, Graz.

1. Die Berechnungsweise der Schwingungen.

Wegen der relativ langen Periode der Schwingungen im Stollen braucht man bei der Ermittlung der Spiegelbewegung die Elastizität der Stollenwandung sowie jene des Wassers nicht zu berücksichtigen. Der Wasserspiegel am Wehr, bezw. am Stollenmundloch wird auf konstanter Höhe vorausgesetzt und die lebendige Kraft des Wassers vor dem Stollenmundloch sowie jene des Wasserschloss-Inhaltes gegenüber der lebendigen Kraft des Stolleninhaltes vernachlässigt. Da über die Geschwindigkeitsverteilung in weiten Stollen noch keine verlässlichen Messungen vorliegen, wird die lebendige Kraft des Stolleninhaltes von der Masse M am besten gleich $\frac{1}{2}MU^2$ angenommen, wobei mit U die mittlere Geschwindigkeit bezeichnet ist[1]); tatsächlich wird sie etwas grösser sein, da $\Sigma\, \frac{1}{2}mu^2 > \frac{1}{2}MU^2$ ist, wenn unter u die Geschwindigkeit eines Massenteilchens m verstanden wird.

Es sei nun die Arbeit betrachtet, die das Wasser beim Uebergang vom Wehrbecken zum Wasserschloss leistet und nachgesehen, wozu sie verbraucht wird. Ins Wasserschloss strömt in der Zeit dt Wasser vom Gewicht $\gamma FUdt$ und es leistet hierbei, da der Spiegel im Wasserschloss um z tiefer liegt, die Arbeit $\gamma FUzdt$; diese Arbeit wird verbraucht zur Ueberwindung der Reibung im Stollen, zur Ueberwindung des Eintrittswiderstandes am Stollenmundloch, zur Erzeugung der Geschwindigkeit U im Stollen und bei Störung der Beharrlichkeit auch noch zur Beschleunigung des Stollen-Inhaltes. Bedeutet L die Stollenlänge, R dessen Profilradius, c den Geschwindigkeits-Koeffizienten nach Chézy, so ist der Druckverlust der von der Reibung im Stollen herrührt $\frac{LU^2}{c^2 R}$ und jener der am Stollenmundloch entsteht $\frac{U^2}{2g\mu^2}$, wobei μ den Ausfluss-Koeffizienten für das Stollenmundloch bedeutet. Die beim Eintritt in den Stollen und beim Durchströmen desselben verbrauchte Arbeit beträgt daher

$$\gamma F dt \left(\frac{L}{c^2 R} + \frac{1}{2g\mu^2}\right) U^3 = \gamma F U H dt \quad . \quad . \quad . \quad (1)$$

wenn H der totale Gefällsverlust entsprechend U. Die lebendige Kraft des Stolleninhaltes endlich beträgt $\frac{1}{2}\frac{\gamma}{g} FLU^2$ und sie ändert sich in der Zeit dt um $\frac{\gamma}{g} FLUdU$. Bei Störung der Beharrlichkeit besteht dann die Arbeitsgleichung

$$\gamma F U z\, dt = \gamma F dt \left(\frac{L}{c^2 R} + \frac{1}{2g\mu^2}\right) U^3 + \frac{\gamma}{g} F L U dU \quad (2)$$

oder

$$z = H + \frac{L dU}{g dt} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (3)$$

Diese Arbeitsgleichung führt bei ihrer weitern Umformung bekanntlich auf eine Differentialgleichung zweiter Ordnung, die nicht lösbar ist. Um aber doch eine ziffermässige Auswertung zu ermöglichen, wurden von den verschiedenen Autoren, die sich mit dieser Frage befasst haben, vereinfachende Annahmen gemacht oder Kniffe angewendet, die, wenn schon der zeitliche Verlauf der Spiegelbewegung nicht berechnet werden kann, doch wenigstens die äussersten Spiegellagen zu ermitteln erlauben. Die von den verschiedenen Autoren empfohlenen Berechnungsweisen seien nur kurz zusammengestellt. Da die Reibung im Stollen erfahrungsgemäss etwa dem Quadrat der Geschwindigkeit proportional ist, werden Lösungen, bei denen die Reibung gänzlich vernachlässigt oder der Geschwindigkeit proportional gesetzt ist, weil nicht zutreffend, nicht weiter erwähnt. Um die Schreibweise der Formeln vereinfachen und übersichtlicher gestalten zu können, wird im weitern der Bruch

$$\frac{2g F_s}{c^2 R F} = \frac{2g F_s H_b}{L F U^2} = m \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (4)$$

gesetzt und kurz als Wasserschloss-Charakteristik bezeichnet. Darin bedeutet F_s den Querschnitt des Wasserschlosses, F den Querschnitt des Stollens, L die Länge desselben, R dessen Profilradius, U die mittlere Geschwindigkeit im Stollen, c den Geschwindigkeitskoeffizienten und H_b den Druckverlust im Beharrungszustand.

Für den Fall plötzlicher und gänzlicher Absperrung des gesamten Durchflusses und konstanten Wasserschloss-Querschnitt berechnet *F. Prášil*[1]) die grösste Spiegelerhebung über das Betriebsniveau im Wasserschloss und erhält die Beziehung

$$mZ + e^{-mZ} = mH_b + 1 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (5)$$

Auf einen ähnlichen Ausdruck kommt *Ph. Forchheimer*[2]), der für die grösste Spiegelerhebung über den Ruhespiegel (Spiegellage am Beginn des Druckstollens) die Gleichung

$$(mZ + 1) - \log \text{nat}\,(mZ + 1) = mH_b + 1 \quad . \quad (6)$$

angibt. Die angestellten Versuche, die später beschrieben werden, haben ergeben, dass diese Formel gut zutrifft; da Tabellen natürlicher Logarithmen nicht immer zur Hand sind, sei zur leichteren Ausrechnung die nachstehende Tabelle I (Seite 130) mitgeteilt.

Für den selben Fall fand *W. Liebisch*[3]), wenn $\frac{H}{Z}$ nicht sehr von 1 verschieden ist, die leicht auswertbare Beziehung

$$Z = H_b - \sqrt{H_b^2 + 2{,}40\,\frac{H_b}{m}} \quad . \quad . \quad . \quad (7)$$

Praktisch nicht weniger wichtig ist die Kenntnis der tiefsten Spiegellage bei plötzlicher Inbetriebnahme der Anlage. Auch mit diesem Falle beschäftigte sich *Ph. Forchheimer*[4]) und gelangte für den tiefsten Spiegelausschlag unter die Ruhespiegellage zur Beziehung

$$Z = 0{,}178\, H_b + \sqrt{(0{,}178\, H_b)^2 + \frac{2\, H_b}{m}} \quad . \quad . \quad (8)$$

Ziemlich vielseitig untersuchte die Spiegelbewegung im Wasserschloss bei Störungen des Beharrungszustandes *R. Dubs*[5]); sowohl ohne, als auch mit Berücksichtigung des Reibungswiderstandes im Stollen betrachtete er die Spiegellagenänderungen im Wasserschloss bei kurzer wie auch bei langer Dauer der Bewegung der Absperrorgane der Druckleitung. Mit Rücksicht darauf, dass einerseits zeitgemäss ausgeführte Turbinenregler meist innerhalb von zwei bis drei Sekunden die Druckrohre vollständig sperren können, und dass anderseits rasches oder plötzliches Sperren die ungünstigen Spiegellagenänderungen bewirkt, ist dieser Fall allein für den entwerfenden Ingenieur von Bedeutung und es seien daher nur die auf diesen Fall bezughabenden Formeln angegeben. Um die aus der Arbeitsgleichung folgende Differentialgleichung integrieren zu können, setzte Dubs die Reibung im Stollen proportional der ersten Potenz der Geschwindigkeit und ermittelte den Proportionalitäts-Faktor auf Grund der Bedingung, dass die bei der Abnahme der Geschwindigkeit im Stollen von U auf 0 zur Ueberwindung der Reibung verbrauchte Gesamtenergie ebenso

---

[1]) U, V und W als Geschwindigkeits-Komponenten im räumlichen X, Y, Z-Koordinatensystem bezeichnet.

[1]) «Schweizer. Bauzeitung», Band 52 (Dezember 1908) S. 334.

[2]) Zeitschrift d. V. D. Ing., 56 (1912) S. 1291.

[3]) Ph. Forchheimer, «Hydraulik», Leipzig 1914, S. 358.

[4]) Zeitschrift d. V. D. Ing., 57 (1913) S. 545.

[5]) Allgemeine Theorie über die veränderliche Bewegung des Wassers in Leitungen. 1909. II. Teil. Stollen und Wasserschloss. Von R. Dubs.

gross ist, als wenn die Reibung proportional dem Quadrate der Geschwindigkeit gesetzt wird. Er erhält so die für die grösste Erhebung des Spiegels über den Spiegel am Wehr gültige, umständlich auswertbare Gleichung

$$Z = \sqrt{\frac{2\,H_b}{m}} \cdot e^{-\alpha t_{\max}} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (9)$$

in der

$$\alpha = \frac{1}{3}\,\frac{g\,H_b}{L\,U} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (10)$$

$$\beta = \sqrt{\frac{g\,F}{L\,F_s} - \alpha^2} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (11)$$

und

$$\mathrm{tg}\,(\beta\, t_{\max}) = \frac{\beta}{\alpha} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (12)$$

bedeuten. Für plötzliches Oeffnen aller Druckleitungen soll nach Dubs der tiefste Ausschlag des Wasserschlosspiegels unter das Ruheniveau aus der Formel

$$Z = \sqrt{\frac{2\,H_b}{m} + \frac{2}{3}\,H_b \cdot e^{-\alpha t_{\max}}} \quad . \quad . \quad . \quad (13)$$

berechnet werden.

K. Pressel[1]) ersetzt in der Arbeitsgleichung, um allen Annahmen und Vernachlässigungen, die gemacht werden müssten, um diese Gleichung integrierbar zu machen, auszuweichen, die Differentiale durch endliche Differenzen und berechnet die gesuchte Wasserstandslinie im Wasserschloss schrittweise. Die Arbeitsgleichung lautet dann

$$z - H - \frac{L}{g}\,\frac{\Delta U}{\Delta t} = 0 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (14)$$

oder

$$\Delta U = \frac{g}{L}\,(z - H)\,\Delta t \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (15)$$

Während der Zeit Δt läuft die Wassermenge $FU\Delta t$ ins Wasserschloss; beträgt die Entnahme durch die Druckrohre Q m³/sek^{-1} so gilt weiter

$$\Delta z F_s = -\,FU\Delta t + Q\Delta t \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (16)$$

oder

$$\Delta z = \left(-\,\frac{F}{F_s}\,U + \frac{Q}{F_s}\right)\Delta t; \quad . \quad . \quad . \quad (17)$$

hierbei ist z nach abwärts und U in der Richtung vom Weiher zum Wasserschloss positiv zu nehmen. Mit den Gleichungen (15) und (17) kann nun die gesuchte Wasserstandslinie leicht berechnet werden.

Dieses schrittweise Verfahren eignet sich ausgezeichnet zu einer Ausgestaltung auf verwickeltere Fälle, wie z. B. die Untersuchung der Spiegelbewegung bei Einschaltung eines Zwischenwasserschlosses[2]), ferner für die Ermittlung der Wasserstandslinien in Wasserschlössern mit veränderlichen Querschnitten oder mit Ueberläufen.

Wird bei Anordnung eines Zwischenwasserschlosses die Entnahme aus dem Endwasserschlosse plötzlich gesperrt, so steigt hier der Wasserspiegel so an, als würde an Stelle des Zwischenwasserschlosses der Wehrweiher liegen. Diese Spiegelhebung kann für das erste Zeitintervall Δt leicht aus den Gleichungen (15) und (17) berechnet werden. Das für diese Spiegelhebung nötige Wasser kommt aus dem Zwischenwasserschloss und verringert hier die Spiegelhebung, die entstehen würde, wenn unmittelbar hinter dem Zwischenwasserschloss der Abfluss gehemmt würde. Die Spiegelhebung im Zwischenwasserschloss kann somit ebenfalls aus den Gleichungen (15) und (17) berechnet werden, wenn für Q der Durchfluss durch den Stollen zum Endwasserschloss eingesetzt wird. Bei der Berechnung von U im Stollen zwischen Zwischen- und Endwasserschloss ist zu beachten, dass die Achse, um die die Schwingungen im Endwasserschloss erfolgen, also der Spiegel im Zwischenwasserschloss, selbst in Bewegung ist, nämlich Schwingungen um die Spiegellage am Stollenanfang vollführt, sodass z. B. beim Wasseranstieg in der Zeit Δt das in die Gleichung (15) einzusetzende z für das Endwasserschloss durch den Spiegelanstieg daselbst verringert, gleichzeitig aber durch den Spiegelanstieg im Zwischenwasserschloss vergrössert wird. Die Rechnung wird mit Vorteil tabellarisch durchgeführt und es sei besonders betont, dass eine erfolgreiche Rechnung nur dann möglich ist, wenn die Vorzeichen der einzelnen Grössen genauest beachtet werden. Auf der nämlichen Grundlage kann natürlich auch die Spiegelbewegung in einer Anlage mit mehr Wasserschlössern durchgerechnet werden.

Tabelle I. Hilfstabelle zur Formel (6) von Ph. Forchheimer.

$mZ+1$	mH_b+1	$mZ+1$	mH_b+1	$mZ+1$	mH_b+1	$mZ+1$	mH_b+1
0,0001	9,210	0,0080	4,836	0,080	2,606	0,41	1,302
2	8,517	85	4,776	85	2,536	42	1,288
3	8,112	90	4,720	90	2,498	43	1,274
4	7,824	95	4,666	95	2,449	44	1,261
5	7,601	0,0100	4,615	0,100	2,403	45	1,249
6	7,419	110	4,521	110	2,317	46	1,237
7	7,265	120	4,435	120	2,240	47	1,225
8	7,132	130	4,356	130	2,170	48	1,214
9	7,014	140	4,283	140	2,106	49	1,203
0,0010	6,909	150	4,215	150	2,047	0,50	1,193
12	6,727	160	4,151	160	1,993	52	1,174
14	6,573	170	4,092	170	1,942	54	1,156
16	6,439	180	4,035	180	1,895	56	1,140
18	6,322	190	3,982	190	1,852	58	1,125
0,0020	6,218	0,0200	3,932	0,200	1,809	0,60	1,111
22	6,122	220	3,839	210	1,771	62	1,098
24	6,035	240	3,754	220	1,734	64	1,086
26	5,955	260	3,676	230	1,700	66	1,076
28	5,881	280	3,604	240	1,667	68	1,066
0,0030	5,812	0,0300	3,537	250	1,636	0,70	1,057
32	5,748	320	3,474	260	1,607	72	1,049
34	5,687	340	3 415	270	1,579	74	1,041
36	5,630	360	3,360	280	1,553	76	1,034
38	5,576	380	3,308	290	1,528	78	1,028
0,0040	5,525	0,0400	3,259	0,300	1,504	0,80	1,023
42	5,477	420	3,212	310	1,481	82	1,018
44	5,431	440	3,168	320	1,459	84	1,014
46	5,386	460	3,125	330	1,439	86	1,011
48	5,344	480	3,085	340	1,419	88	1,008
0,0050	5,303	0,0500	3,046	350	1,400	0,90	1,005
55	5,209	550	2,955	360	1,382	92	1,003
60	5,122	600	2,873	370	1,364	94	1,002
65	5,042	650	2,798	380	1,348	96	1,001
70	4,969	700	2,729	390	1,332	98	1,000
75	4,900	750	2,665	0,400	1,316	1,00	1,000
0,0080	4,836	0,0800	2,606	410	1,302		

Sollen die Spiegelbewegungen untersucht werden, wenn die Entnahme durch einen Geschwindigkeitsregler derart geregelt wird, dass die Leistung der Turbine auch während der Störung des Beharrungszustandes annähernd konstant bleibt, so eignet sich auch hierzu das schrittweise Verfahren gut; beträgt der Spiegelhöhen-Unterschied zwischen Wasserschloss und Unterwasser H', so wird die Leistung in PS bei einer Beaufschlagung mit Q m³/sek^{-1} roh meist nach der Formel

$$N = 10\,qH' \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (18)$$

berechnet. Wird nun konstante Leistung gefordert und ist der Spiegel im Wasserschloss in Bewegung, so beträgt die hierzu nötige Beaufschlagung, die in die Gleichung (17) einzusetzen ist

$$Q = \frac{N}{10\,H'} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (19)$$

A. Strickler[1]) schlägt eine Reihe von Näherungsformeln vor, mit denen er bei einer Ungenauigkeit von nur einigen Prozenten die umständlicher auszuwertenden, genauer ersetzen will. Er schlägt vor:

[1]) «Schweizer. Bauzeitung», Band 53 (30. Januar 1909) S. 57.
[2]) Zeitschrift des öst. Ing.- u. Arch.-Ver. (1921) S. 175.

[1]) «Schweizerische Wasserwirtschaft» (1914) S. 175.

Für plötzlichen Abschluss, wenn

$$\sqrt{{}^1/_2 m H_b} < 4 \qquad Z = 0{,}6\, H_b - \sqrt{\frac{2 H_b}{m}} - 0{,}1 \sqrt{{}^1/_2 m H_b} \quad (20)$$

$$\sqrt{{}^1/_2 m H_b} > 1 \qquad Z = -\frac{1}{m} \quad \ldots \quad (21)$$

$$\sqrt{{}^1/_2 m H_b} < 1{,}5 \qquad Z = 0{,}5\, H_b - \frac{2 H_b}{m} \;{}^{1)} \quad \ldots \quad (22)$$

Für plötzliches Oeffnen, wenn

$$\sqrt{{}^1/_2 m H_b} < 2 \qquad Z = \sqrt{\frac{2 H_b}{m}} + 0{,}25 \sqrt{{}^1/_2 m H^3_b} \quad \ldots \quad (23)$$

$$\sqrt{{}^1/_2 m H_b} > 2 \qquad Z = H_b \text{ (aperiodisch)} \quad \ldots \quad (24)$$

$$\sqrt{{}^1/_2 m H_b} < 1 \qquad Z = 0{,}25\, H_b + \sqrt{\frac{2 H_b}{m}} \;{}^{1)} \quad \ldots \quad (25)$$

L. F. Harza[2]) rechnet bei plötzlichem Abschluss aller Druckrohre die höchste Erhebung des Spiegels über dem Ruhespiegel nach der Formel

$$Z = \sqrt{\frac{2 H_b}{m} - \frac{\pi}{3} \cdot H_b \sqrt{\frac{2 H_b}{m}}} \quad \ldots \quad (26)$$

während *R. D. Johnson*[2]) für diesen Fall die Beziehung

$$Z = H_b - \sqrt{\frac{2 H_b}{m} + H_b^2} \quad \ldots \quad (27)$$

empfiehlt.

Endlich sei noch erwähnt, dass *W. F. Durand*[3]) ein Verfahren ersonnen hat, das es ermöglicht, das Wasserschloss so zu formen, dass bei plötzlichem Abschluss der Druckrohre die Verzögerung des Wassers im Stollen nach einem vorher willkürlich festgesetzten Gesetze vor sich geht. Es ergeben sich nach diesem Verfahren fast immer Wasserschlösser, die sich nach oben erweitern. Das Verfahren ist sehr umständlich und wird wohl nur in Ausnahmsfällen von Interesse sein.

Die bisher angeführten Autoren gingen alle darauf aus, die grössten Spiegelausschläge bei Entnahmeänderungen festzustellen. *D. Thoma*[4]) untersuchte, ob die Schwingungen im Wasserschloss, wenn die Beaufschlagung durch Geschwindigkeitsregler beeinflusst wird, unter allen Umständen gedämpft verlaufen. Er gelangt, unter der Voraussetzung, dass die Turbinenleistung auch während einer Bewegung des Wasserspiegels im Wasserschlosse stets konstant bleiben soll, dass weiter die Spiegelausschläge nur klein sind und der Druckverlust H_b, wie es wohl fast immer der Fall ist, kleiner als ein Drittel des Rohgefälles ist, zu den kritischen Wasserschloss-Charakteristiken, die durch die drei Gleichungen

$$m_1 = \frac{1}{H'_n}\left\{\left[\frac{H'_n}{H_b} - 1\right] - \sqrt{\left[\frac{H'_n}{H_b} - 1\right]^2 - 1}\right\} \quad (28)$$

$$m_2 = \frac{1}{H'_n} \quad \ldots \quad (29)$$

$$m_3 = \frac{1}{H'_n}\left\{\left[\frac{H'_n}{H_b} - 1\right] + \sqrt{\left[\frac{H'_n}{H_b} - 1\right]^2 - 1}\right\} \quad (30)$$

ausgedrückt werden, wobei mit H'_n das Nutzgefälle zwischen Wasserschloss und Unterwasser bezeichnet wird. Ist nun

$m < m_1$, so wächst jede noch so kleine Störung ohne Schwingung zu einem endlichen Ausschlag an;
$m_1 < m < m_2$, so verlaufen die Schwingungen angefacht;
$m_2 < m < m_3$, so verlaufen die Schwingungen gedämpft;
$m > m_3$, so wird nach jeder kleinen Störung der neue Beharrungszustand ohne Schwingung erreicht.

Thoma beweist auch noch, dass seine Gleichungen auch für grössere Ausschläge angenähert verwendbar sind. In der Praxis brauchen hinsichtlich des Entstehens angefachter Schwingungen wohl nur die engen Steigschächte der aufgelösten Wasserschlösser und die engen Standrohre an Druckrohren untersucht zu werden.

Bei der ziffernmässigen Auswertung der angeführten Formeln ist zu beachten, dass für H_b nicht nur der Druckverlust infolge der Reibung im Stollen einzusetzen ist, sondern die Summe aller Druckverluste vom Weiher bis zum Wasserschloss. Für den Geschwindigkeitskoeffizienten c ist nämlich nicht der dem Stollen entsprechende zu nehmen, sondern vielmehr aus der Formel $U = c \sqrt{\frac{R H_b}{L}}$ ein „Rechnungs-c" für das ganze schwingfähige System zu ermitteln. Ist ein Teil der Leitung mit anderen Querschnitten, z. B. als Düker, Kanalbrücke oder dergleichen ausgeführt, so werden die Gefällsverluste in der bekannten Weise aus den gegebenen Leitungsabmessungen berechnet. Für die Ermittlung der Spiegelbewegung muss aber dann ein einheitlicher Querschnitt angenommen werden, und zwar jener, in dem der grösste Teil der Leitung ausgeführt ist. In solchen Fällen ist zu berücksichtigen, dass die lebendige Kraft des Längenmeters der Leitungsteile mit den verschiedenen Querschnitten wegen der verschieden darin herrschenden Geschwindigkeiten verschieden ist. Man kann sich nun die Strecke mit dem von der übrigen Ausführung abweichenden Querschnitt durch eine solche mit gleichem Querschnitt wie in der übrigen Strecke ersetzt denken, nur muss die Länge dieser Ersatzstrecke geändert und derart bemessen werden, dass die lebendige Kraft des Inhaltes der tatsächlichen sowie der Ersatzstrecke gleich sind. Bezeichnen L_1 die Länge, F_1 den Querschnitt der abweichenden Strecke und U_1 die mittlere Geschwindigkeit darin, L die Länge der Ersatzstrecke, F deren Querschnitt und U die mittlere Geschwindigkeit darin, so muss also

$${}^1/_2 \frac{\gamma}{g} L_1 F_1 U_1^2 = {}^1/_2 \frac{\gamma}{g} F U^2 \quad \ldots \quad (31)$$

sein, oder, da $F_1 U_1 = F U$ ist, die Länge der Ersatzstrecke

$$L = L_1 \frac{F}{F_1} \quad \ldots \quad (32)$$

sein.

2. Rückwirkung der Spiegelschwingungen im Wasserschloss auf die Spiegellage am Wehr.

Bei allen bisherigen Untersuchungen über die Spiegelbewegung in Wasserschlössern war die Spiegellage am Beginne des Druckstollens konstant angenommen worden. Diese Voraussetzung trifft streng genommen nur dann zu, wenn der Druckstollen unmittelbar aus einem sehr grossen Weiher gespeist wird; fliesst indessen das Wasser dem Stollen von einem Wehrweiher zu, so wird der Spiegel hier, wenn der Abfluss durch den Stollen gehemmt ist, so lange ansteigen, bis der Zufluss über die Schützentafeln, ein Streichwehr oder dergl. ablaufen kann. Zum Zufluss aus dem Flussgebiete tritt während der Rückschwingung im Wasserschloss noch der Rückfluss aus diesem hinzu, der, wenn es sich um höhere Spiegelausschläge handelt, bei der Bemessung der Ueberläufe am Wehr nicht mehr zu vernachlässigen ist.

3. Ueberprüfung der verschiedenen Formeln durch Versuche.

Bisher sind systematische Versuche zur Ueberprüfung der aufgestellten Formeln noch nicht gemacht, zumindest nicht bekannt geworden; in Anbetracht der Wichtigkeit einer genauen Ermittlung der äussersten Spiegelausschläge in Wasserschlössern schien es jedoch ratsam, die Spiegelbewegung in Wasserschlössern einmal experimentell zu beachten. Dank dem besonderen Entgegenkommen des Direktors der „Steirischen Wasserkraft- und Elektrizitäts-A.-G.", Herrn Oberbaurat R. Hofbauer, der die für die Durchführung der Versuche nötigen Geldmittel von der A.-G. beistellte, und des Grazer Städtischen Wasserwerkes, das die Versuche durch die kostenlose Ueberlassung des nötigen Rohmaterials unterstützte, konnte eine grössere Versuchsanlage im Garten der Technischen Hochschule in Graz zusammengestellt werden, an der eine Reihe von Versuchen, die nun näher beschrieben werden sollen, angestellt wurden.

(Schluss folgt.)

1) Sogenannte Schmitthenner-Haller'sche Formel.

2) Eng. Rec. Bd. 71 (1915) S. 379.

3) Eng. Rec. Bd. 64 (1911) S. 133.

4) D. Thoma, „Beiträge zur Theorie des Wasserschlosses bei selbsttätig geregelten Turbinenanlagen". Dissertation. München 1910.