Zeitschrift: Schweizerische Bauzeitung

Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine

Band: 78 (1960)

Heft: 17

Artikel: Aus der Projektierung der Kraftwerke Hinterrhein: Entwurf und Berechnung der Wasserschlösser

Autor: Ribi, R.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-64878

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: 11.07.2025

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

ORGAN DES SCHWEIZERISCHEN INGENIEUR- UND ARCHITEKTEN-VEREINS S.I.A. UND DER GESELLSCHAFT EHEMALIGER STUDIERENDER DER EIDGENÖSSISCHEN TECHNISCHEN HOCHSCHULE G.E.P.

Aus der Projektierung der Kraftwerke Hinterrhein

Fortsetzung von S. 55 DK 627.8.002.1

Motor-Columbus AG., Baden

Entwurf und Berechnung der Wasserschlösser

Von **R. Ribi**, dipl. Math. und dipl. Ing. ETH

I. Einleitung

Für die drei Stufen der Kraftwerke Hinterrhein sind die für Hochdruckkraftwerke bedeutenden Ausbauwassermengen von 45 m³/s (Stufe Valle di Lei—Ferrera), 80 m³/s (Stufe Sufers—Bärenburg) und 73 m³/s (Stufe Bärenburg—Sils) festgelegt worden. Diese grossen maximalen Durchflüsse in Druckstollen von 6,9, 3,4 und 13,0 km Länge, sowie die sehr streng angenommenen ungünstigsten Betriebsbedingungen hatten zur Folge, dass die Wasserschlösser Ferrera, Bärenburg und Sils zu Bauwerken von erheblicher Grösse geworden sind [1]). Es soll daher im folgenden von ihnen eine kurze Beschreibung gegeben und einige Einzelheiten ihrer Projektierung behandelt werden, wie insbesondere die Berechnung der Massenschwingungen mit Hilfe eines programmgesteuerten Rechenautomaten und der Weiterausbau eines von Vogt in [1] [2]) und Gardel in [2] und [3] entwickelten direkten Dimensionierungsverfahrens für Wasserschlösser.

II. Konstruktives

Als Grundtypus für alle drei Oberwasserschlösser der Kraftwerke Hinterrhein ist das ungedrosselte Kammerwasserschloss mit vertikalem Steigschacht gewählt worden. Auf eine die Volumina der Kammern vermindernde Drosselung wurde verzichtet, um das Durchlaufen des Druckstosses vom Druckschacht in den Druckstollen so stark wie möglich einzuschränken. Die als Stollen mit kreisförmigem Querschnitt gestaltete untere Kammer ist jeweils so angeordnet, dass sie in ihrer ganzen Länge durch das ins Wasserschloss eintretende oder daraus austretende Wasser durchflossen wird. Dadurch wird die Ablagerung von allenfalls noch schwebendem Feinsand erschwert. Mit Blech verkleidet wird vom Wasserschloss lediglich der Anschlusstutzen zur gepanzerten Druckstollenendzone, der als 80 % geneigter Schrägschacht vom Druckstollen seitlich abzweigt und jeweils den selben Durchmesser wie dieser aufweist. Die obere Kammer (im Wasserschloss Sils durch ein im Freien liegendes Becken ersetzt) ist womöglich als Differentialkammer ausgebildet. Dies wird durch eine Ueberhöhung des Steigschachtes über die Sohle der oberen Kammer hinaus bewerkstelligt mit dem Zweck, deren Volumen bei gegebener Schwerpunkthöhe möglichst klein zu halten. Die Entleerung der Kammer bei sinkendem Wasserspiegel im Schacht wird durch Oeffnungen am Fusse der Schachtüberhöhung ermöglicht. In Ferrera und in Bärenburg münden Zuleitungsstollen von Nebenfassungen her in die obere Wasserschlosskammer. Zur hydraulisch einwandfreien Einleitung des zugeführten Wassers und um das Mitreissen von Luft möglichst herabzusetzen, wird ein Spiralgerinne, das den Schacht umläuft, gebaut. Bei dieser Anordnung, die unseres Wissens in der Schweiz erstmals beim Bau der Maggia-Kraftwerke gewählt worden ist, wird das Wasser tangential zu dem in seinem obersten Teil trichterförmig gestalteten Steigschacht zugeleitet, fällt auf dem Umfang gleichmässig verteilt seitlich in diesen über und fliesst praktisch ohne sich in Gischt aufzulösen den Schachtwandungen entlang in die Tiefe.

Die wesentlichsten Daten der drei Wasserschlösser sind in der untenstehenden Tabelle zusammengestellt und teilweise auch aus den Bildern 1 und 2 ersichtlich.

III. Dimensionierung

Die Bauarbeiten an den Wasserschlössern müssen oft gleichzeitig mit denen an den Druckstollen an die Unternehmer vergeben werden; dies bedeutet, dass die Hauptmasse von Schacht und Kammern zu einem Zeitpunkt bekannt sein müssen, da über die Turbinen und ihre Regulierung meistens nur generelle Angaben zur Verfügung stehen. Der die Wasserschlösser entwerfende Ingenieur muss diese daher vorerst auf Grund von Methoden berechnen, die, gemessen am heutigen Stand der Theorie, relativ grob sind. Diese Berechnungen sind dann gegebenenfalls in einem späteren Zeitpunkt durch feinere Untersuchungen zu ergänzen, auf die hier nicht eingegangen werden soll.

A) Grundlagen

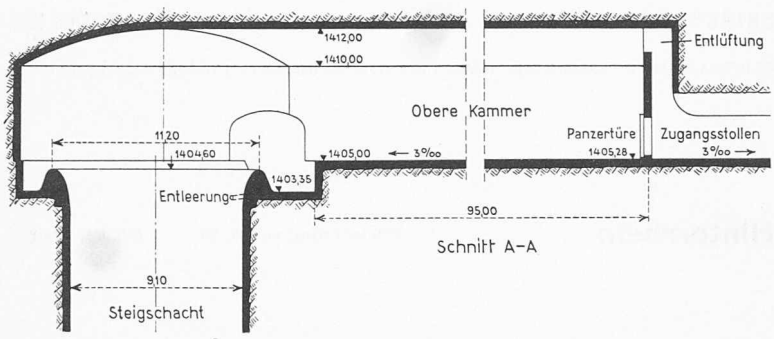
Die Dimensionierung der oben beschriebenen Wasserschlösser geschah in drei Schritten. Zuerst wurden, wie üblich, die Dimensionen des Steigschachtes bestimmt, und zwar mit Hilfe der Formel von *Thoma* sowie ihrer von *Evangelisti* vorgeschlagenen Verfeinerungen, die den Einfluss des Druckschachtes, der Zuleitungen zum Druckstollen usw. auf die Stabilität des Wasserschlosses berücksichtigen (vgl. [4] oder [5]). Darauf folgte die erste Dimensionierung der Kammern mit Hilfe eines überschlägigen Verfahrens, auf das in Abschnitt IV näher eingegangen wird. Schliesslich wurden in

Hauptdaten der Wasserschlösser der Kraftwerke Hinterrhein

Wasserschloss	Ferrera	Bärenburg	Sils
Ausbauwassermenge	45 m³/s	80 m³/s	73 m³/s
Druckstollenlänge	6,90 km	3,40 km	13,00 km
Druckstollendurchmesser	4,30 m	5,60 m	5,40 m
Obere Kammer:	Differential-kammer	Gewöhnliche Kammer (vgl. Bild 2)	Expansions-becken mit Differentialschacht (vgl. Bild 1)
Breite	8,00 m	6,40 m	
Länge	60 m	110 m	
Volumen	4500 m³	5200 m³	5800 m³
Vertikalschacht:			
Durchmesser	4,75 m	9,10 m	8,60 m
Höhe	123 m	46 m	64 m
Volumen	2200 m³	3000 m³	3700 m³
Untere Kammer:			
Durchmesser	9,00 m	9,10 m	10,00 m
Länge	100 m	100 m	140 m
Volumen	6400 m³	6500 m³	11 000 m³

[1]) Da der Ueberleitungsstollen von Ferrera nach Sufers als Druckstollen ausgebildet wird, um das Pumpen aus dem Stausee Sufers zu ermöglichen, musste im Unterwasser der Kaverne Ferrera ein weiteres Wasserschloss angeordnet werden, in das die Saugrohre der Francisturbinen münden. Auf dieses Unterwasserschloss soll hier nicht näher eingegangen werden.

[2]) Zahlen in eckigen Klammern verweisen auf das Literaturverzeichnis am Ende des Aufsatzes.



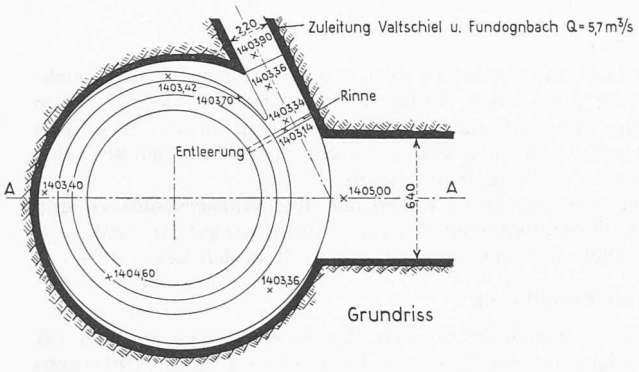


Bild 2. Wasserschloss Bärenburg, obere Kammer mit Einlaufspirale, Schnitt 1:400

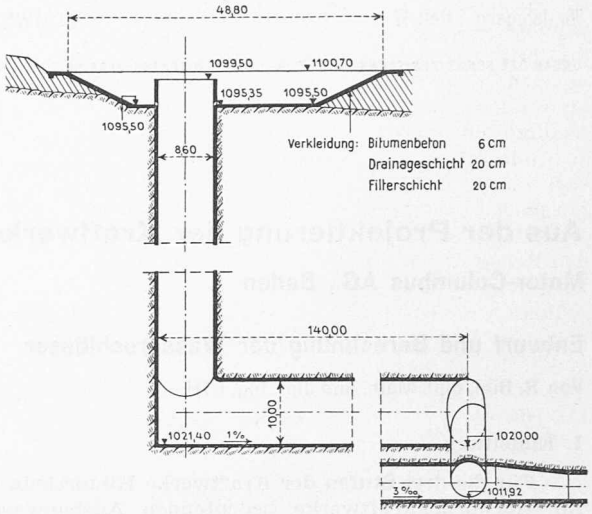


Bild 1. Wasserschloss Sils, Schnitt 1:1200. Das Expansionsbecken ist mit einem Ueberlaufschacht und Durchlässen am Schachtfuss ausgerüstet

einem dritten Schritt die Masse des Wasserschlosses auf Grund der expliziten Berechnung der Schwingungen festgelegt, die im Druckstollen und im Wasserschloss infolge der angenommenen ungünstigsten Belastungsänderungen zu erwarten sind. Als solche hat man festgesetzt:

a) Bei maximaler Höhe des Betriebswasserspiegels im Stausee: ein totales Schliessen von der Ausbauwassermenge Q_0 auf 0 in der Schliesszeit T_s der Turbinen, beziehungsweise der Druckregler.

b) Bei minimaler Höhe des Betriebswasserspiegels im Stausee: ein Schliessen von $Q = Q_0$ auf die Leerlaufwassermenge Q_n (= 5 bis 10 % von Q_0) in der Zeit T_s und ein Wiederöffnen auf $Q = Q_0$ in der Zeit T_{oe} im Augenblick, wo im Druckstollen die Wassergeschwindigkeit ihr erstes Minimum erreicht.

Die Oeffnungs- und Schliesszeiten betragen 20 bis 40 s. Sie sind eine Funktion der Art und Grösse der Abschlussorgane und des zulässigen Druckstosses.

Die Bedingungen a) und b) sind relativ streng [vor allem b)], jedoch nicht die strengsten, die man sich denken kann; denn es dürften sich leicht durch geeignete Kombination von Oeffnungs- und Schliessvorgängen Operationen finden lassen, die noch ungünstiger sind als die oben festgelegten, z. B. statt a) Oeffnen — Schliessen und statt b) Oeffnen — Schliessen — Oeffnen, wobei jedes Manöver im ungünstigsten Punkt der Schwingung ansetzt, die durch die vorausgehenden Operationen hervorgerufen wird. Solche Kombinationen wurden aber als zu unwahrscheinlich ausgeschlossen. Immerhin mussten die ungünstigsten Belastungsänderungen so streng angenommen werden, dass eine praktisch unbeschränkte Freiheit des Betriebes garantiert ist.

B) Explizite Berechnung der Schwingungen

Die überschlägig ermittelten Schwingungsdauern der Systeme liessen erwarten, dass teilweise Rechnungen über Zeitbereiche bis zu rd. 800 s erforderlich sein würden, so dass die explizite Berechnung der Schwingungen in den drei Anlagen von Hand eine beträchtliche Zeit beansprucht hätte. Es lag somit nahe, die Durchführung solcher Berechnungen mit Hilfe eines programmgesteuerten Rechenautomaten durchzuführen. In den USA und in Frankreich sind schon seit einiger Zeit Wasserschlosschwingungen auf diesem Weg berechnet worden.

So wurde vorerst ein Programm ausgearbeitet, mit dessen Hilfe die Schwingungen in Wasserschlössern von den bei den Kraftwerken Hinterrhein vorkommenden Typen auf der elektronischen Rechenmaschine IBM 650 der International Business Machines berechnet werden konnten. Die Integration der Differentialgleichungen geschieht dabei nach der üblichen Differenzenmethode. Bild 4 zeigt als Beispiel das logische Schema, nach dem die Berechnung derjenigen Oszillationen abläuft, die in einem gewöhnlichen Kammerwasserschloss durch Laständerungen gemäss Bedingung b) (Schliessen — Oeffnen) hervorgerufen werden. Die Bedeutung der Bezeichnungen ist aus Bild 3 ersichtlich. Die Sechsecke im Schema stehen für die Verzweigungen (Tests) des Programms: Ist die im Sechseck angegebene Bedingung erfüllt, so geht die Rechnung über J (= Ja), sonst über N (= Nein) weiter. Eingegeben werden die auf Lochkarten gestanzten geometrischen und hydraulischen Daten des Systems sowie die Angaben über das im besondern zu behandelnde Problem [Bedingung a) oder b), Oeffnungs- und Schliesszeiten usw.]. Am Ende jedes Integrationsintervalls stanzt die Maschine eine Karte, die die Zeit T, die Wasserspiegelhöhe Z im Wasserschloss, die Wassergeschwindigkeit W im Druckstollen, den Wasserdurchfluss Q_T im Druckschacht und die Fläche $F(Z)$ des Wasserschlosses auf der Höhe Z enthält. Die Rechnung ist beendet, entweder wenn der Wasserspiegel unter die untere Kammer sinkt (Stop 0001) oder wenn er seine tiefste Lage überschritten hat (Stop 0002).

Durch einfache Modifikationen dieses Grundprogrammes und durch Kombination mehrerer solcher Programme sind die Schwingungen in verschiedenartigen Wasserschlössern oder in Systemen von Wasserschlössern unter den mannigfachsten Bedingungen der automatischen Berechnung zugänglich gemacht worden. Die Erfahrung hat gezeigt, dass es nicht vorteilhaft ist, die Berechnung der Schwingungen

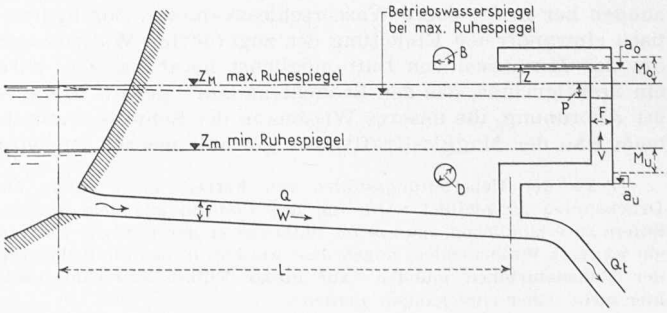


Bild 3. Schematische Darstellung einer Wasserkraftanlage mit Kammerwasserschloss

in mehreren Wasserschlosstypen in einem Programm zusammenfassen. Besser ist es, eine Anzahl Einzelprogramme mit praktisch gleichbleibendem Kern auszuarbeiten. Es ist auch oft nicht lohnend, wegen einer in einer einzelnen Anlage auftretenden Partikularität eines dieser Programme zu modifzieren, sondern da bietet sich dem Sachbearbeiter, der sich mit den Wasserschlössern beschäftigt, eine Gelegenheit, sich wieder einmal in der Handrechnung oder in einem graphischen Verfahren zu üben. Diese Uebung ist unbedingt erforderlich, um die bei der maschinellen Berechnung anfallenden Resultattabellen rasch und sicher zu prüfen, und um die notwendigen Aenderungen an den Dimensionen des Wasserschlosses zu schätzen, wenn die Rechnung noch nicht befriedigt. Sie bleibt somit eine wesentliche Grundlage zur rationellen Benützung der elektronischen Rechenmaschine.

IV. Die überschlägige Bestimmung der Kammervolumina

Die überschlägige Bestimmung des erforderlichen Volumens einer Kammer, deren Schwerpunktshöhe man kennt, soll auf die Konsultation eines Diagrammes, verbunden mit einigen sehr einfachen Zwischenrechnungen, reduziert werden. Natürlich sollten auch dieser Annäherung als massgebende Bedingungen die in Abschnitt II unter a) und b) definierten Oeffnungs- und Schliessvorgänge zu Grunde gelegt werden. Dies ist aber nicht möglich, da die angestrebte

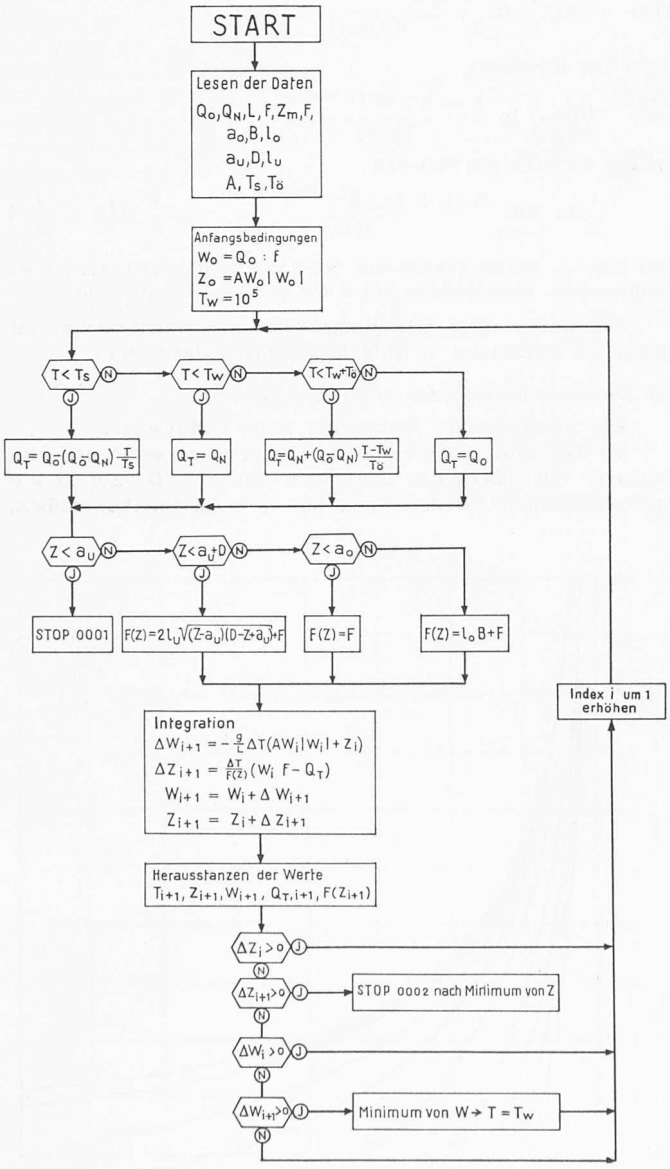


Bild 4. Logisches Schema der Berechnung des minimalen Wasserspiegels in einem gewöhnlichen Kammerwasserschloss mit Hilfe eines programmgesteuerten Rechenautomaten. (Minimum für Schliessen — Oeffnen)

Vereinfachung der Berechnung einerseits explizit integrierbare Ausdrücke und anderseits eine Reduktion der Anzahl der Parameter erfordert. Es müssen daher die weiter hinten formulierten Bedingungen a') und b'), die a) und b) möglichst nahe kommen, als massgebend festgesetzt werden. Die folgende Untersuchung fusst auf den schon erwähnten Arbeiten von *Vogt* [1] und *Gardel* [2 und 3], deren Ergebnisse teilweise wiederholt werden.

A) Begriffe und Grungleichungen

In einer Wasserkraftanlage, wie sie schematisch in Bild 3 dargestellt ist, führen wir die folgenden Bezeichnungen ein:

L = Länge des Druckstollens
f = Fläche des Druckstollenquerschnittes
F = Fläche des Steigschachtquerschnittes
g = Erdbeschleunigung
T = Zeit
Q = Wasserdurchfluss im Druckstollen
Q_T = Wasserdurchfluss im Druckschacht
W = Q/f = Wassergeschwindigkeit im Druckstollen
V = vertikale Steiggeschwindigkeit im Schacht
Z = Höhe des Wasserspiegels über dem Ruhewasserspiegel im Wasserschloss
P = $A W^2$ = Druckverluste zwischen See und Wasserschloss beim Durchfluss Q, einschliessl. Geschwindigkeitshöhe (A = konst),
W_0, V_0 und P_0 bezeichnen die entsprechenden Grössen im Augenblick, da $Q = Q_0$ ist.

Aus den oben zusammengestellten Grössen werden die folgenden dimensionslosen Relativwerte gebildet:

$$t = \frac{T}{T_0} \quad \text{und} \quad T_0 = \frac{W_0 L}{g P_0}$$

$$q = \frac{Q_T}{Q_0}$$

$$v = \frac{V}{V_0}$$

$$w = \frac{W}{W_0}$$

$$z = \frac{Z}{P_0}$$

$$s = \frac{F}{S_0} \quad \text{mit} \quad S_0 = \frac{W_0^2 L f}{g P_0^2}$$

Bei Verwendung dieser Bezeichnungen lauten die die Massenschwingung bestimmenden Gleichungen:

$$(1) \qquad \frac{dw}{dt} + z + w^2 \frac{w}{|w|} = 0 \qquad \text{(Bewegungsgleichung)}$$

$$(2) \qquad w = s \frac{dz}{dt} + q \qquad \text{(Kontinuitätsgleichung)}$$

B) Die Schwingung im Schacht

In diesem Unterabschnitt soll die Wasserspiegel-Schwingung untersucht werden, die in dem vorläufig nach oben und unten unbegrenzt gedachten Schacht hervorgerufen wird durch ein plötzliches Schliessen von $Q = Q_0$ auf $Q = 0$. Die Bedingung (2) wird somit zu

$$(2') \qquad w = s \frac{dz}{dt} \quad \text{für } t > 0$$

und die Anfangsbedingungen lauten:

$$(3) \qquad \left.\begin{aligned} w &= w_0 \\ z &= -1 \end{aligned}\right\} \text{ für } t = 0$$

1. Erstes Aufschwingen

Es ist $w > 0$, und somit verwandelt sich (1) in

$$(1') \qquad \frac{dw}{dt} + z + w^2 = 0$$

Mit Hilfe der Substitution $u(z) = w^2$ lässt sich unter Berücksichtigung von (3) ein erstes Integral des aus (1') und (2') bestehenden Systems von Differentialgleichungen angeben, in Form einer Beziehung zwischen w und z:

$$(4) \qquad w^2 = -z + \frac{1}{2s}\left[1 - e^{-2s(1+z)}\right]$$

z erreiche sein Maximum z_m im Zeitpunkt t_m. Es ist also $w(t_m) = 0$, und (4) geht über in die Gleichung von Forchheimer:

$$(5) \quad 2 s z_m + \ln(1 - 2 s z_m) + 2 s = 0$$

Die numerische Auswertung dieser Formel findet man z. B. in [4] S. 147.

2. Erstes Abschwingen

Da wir die Schwingung nicht weiter als bis zum ersten Minimum untersuchen wollen, können wir schreiben $w < 0$ für $t > t_m$. Für diese Fortsetzung der Schwingung wird daher (1) zu

$$(1'') \quad \frac{dw}{dt} + z - w^2 = 0$$

mit den Anfangsbedingungen

$$(6) \quad \left.\begin{array}{l} z = z_m \\ w = 0 \end{array}\right\} \text{ für } t = t_m$$

Mit Hilfe der gleichen Substitution $u(z) = w^2$ wie oben und unter Berücksichtigung von (6) lässt sich ein erstes Integral des aus (1″) und (2′) bestehenden Systems von Differentialgleichungen angeben, nämlich:

$$(7) \quad w^2 = z + \frac{1}{2s} - \left(z_m + \frac{1}{2s}\right) e^{-2s(z_m - z)}$$

Nun soll der erste Wendepunkt der Kurve $z(t)$ betrachtet werden. Die relative Geschwindigkeit w erreicht dort ihr Minimum.

Es gelten also:

$$\left.\begin{array}{ll} (8) & z = z_w \\ (9) & w = w_w \\ (10) & \dfrac{dw}{dt} = 0 \end{array}\right\} \text{ für } t = t_w$$

(8) und (9) in (7) eingesetzt ergeben die Beziehung

$$(11) \quad w_w^2 = z_w + \frac{1}{2s} - \left(z_m + \frac{1}{2s}\right) e^{-2s(z_m - z_w)}$$

Differenziert man (7) nach z und berücksichtigt man (8), (9) und (10), so ergibt sich

$$(12) \quad \left(z_m + \frac{1}{2s}\right) e^{-2s(z_m - z_w)} = 1$$

Wird nun schliesslich aus (12) und (11) z_m eliminiert, so erhält man die überraschend einfache Gleichung

$$(13) \quad w_w = -\sqrt{z_w}$$

C) Erforderliche Kammervolumina

Bezeichnet T_1 den Zeitpunkt, in dem der Wasserspiegel die obere bzw. die untere Kammer erreicht, und T_2 denjenigen Augenblick, in dem Z das nächste Mal extremal wird ($T_2 > T_1$), so berechnet sich das Wasservolumen, das in das Wasserschloss eintritt, aus

$$(14) \quad C = \int_{T_1}^{T_2} V F \, dT$$

oder mit relativen Grössen geschrieben

$$(15) \quad c = \int_{t_1}^{t_2} v \, dt \quad \text{mit} \quad c = \frac{C}{P_0 S_0}$$

Hat man der Berechnung die ungünstigsten Manöver an den Schliessorganen zu Grunde gelegt, so gibt C das theoretisch erforderliche Kammervolumen an.

D) Dimensionierung der oberen Kammer

Als massgebende Bedingung wird festgesetzt:

a′) Bei maximaler Höhe des Betriebswasserspiegels im Stausee: ein plötzliches Schliessen von $Q = Q_0$ auf $Q = 0$.

Wir idealisieren nun das Wasserschloss in der Weise, dass wir annehmen, der Schacht würde in eine obere Kammer von unendlich grosser Grundfläche mit Boden auf der Höhe des Schwerpunktes der projektierten wirklichen Kammer münden, d. h. für $t \geqslant t_1$ gilt

$$(16) \quad z = m_o = \frac{M_o}{P_0} = \text{konst}$$

Unter Berücksichtigung von (16) lässt sich (1) nun leicht explizit integrieren, vgl. [2]. Das von *Gardel* in [2] eingeführte fiktive Wasserschloss hat die selbe idealisierte Kammer, wie wir sie eingeführt haben, dazu aber einen Schacht von verschwindender Fläche. Für plötzliches Schliessen von $Q_1 = n_1 Q_0$ ($n \geqslant 1$) auf $Q = 0$ erhält Gardel

$$(17) \quad c_o = \frac{1}{2} \ln\left(1 + \frac{n_1^2}{m_o}\right)$$

Dabei ist $n_1 = \dfrac{Q_s}{Q_0} = \dfrac{W_1}{W_0} = w_1$

Es ist nun leicht zu sehen, dass das plötzliche totale Schliessen in unserem fiktiven Wasserschloss mit endlicher Schachtfläche einem plötzlichen partiellen Schliessen im idealisierten System von Gardel entspricht, und zwar ist n_1 gleich der relativen Geschwindigkeit w_1 im Zeitpunkt des Eintritts des Wasserspiegels in die fiktive obere Kammer unserer Idealisation:

w_1 in (4) und (4) in (17) eingesetzt ergibt:

$$(18) \quad c_o = \frac{1}{2} \ln \frac{1 - e^{-2s(1 + m_o)}}{2 s m_o} \quad ^{3)}$$

3) Der Grenzwert

$$\lim_{s \to 0} \frac{1}{2} \ln \frac{1 - e^{-2s(1 + m_o)}}{2 s m_o}$$

ist nach der Regel von Bernoulli

$$\frac{1}{2} \ln \lim_{s \to 0} \frac{2(1 + m_o) e^{-2s(1 + m_o)}}{2 m_o} = \frac{1}{2} \ln\left(1 + \frac{1}{m_o}\right)$$

was dem von Gardel gewonnenen Wert von c_o für plötzliches totales Schliessen im Wasserschloss mit $F = 0$ (d. h. $s = 0$) entspricht.

Die durch diese Gleichung definierte Kurvenschar ist mit s als Parameter in Bild 5 graphisch dargestellt.

E) Dimensionierung der unteren Kammer

Als massgebende Bedingung wird festgesetzt:

b′) Bei minimaler Höhe des Betriebswasserspiegels im Stausee: ein plötzliches Schliessen von $Q = Q_0$ auf $Q = 0$ mit plötzlichem Wiederöffnen auf $Q = Q_0$ im Augenblick,

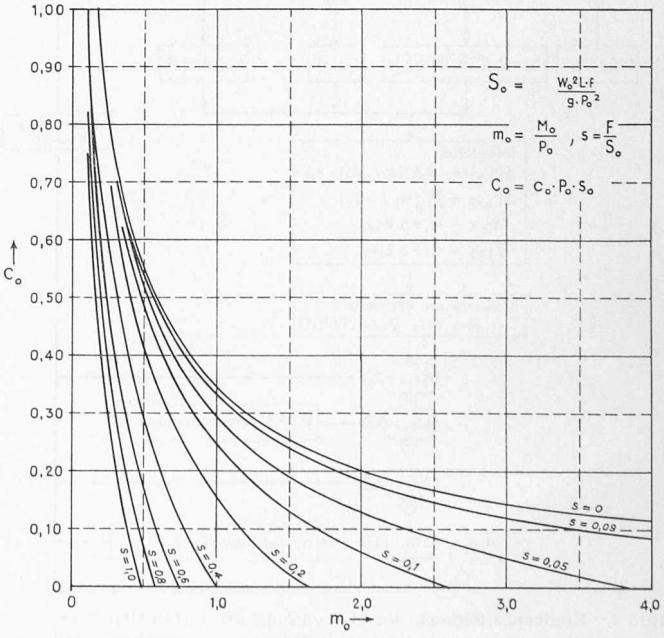


Bild 5. Diagramm für das relative Volumen c_o der oberen Kammer (für totales Schliessen)

da die Wassergeschwindigkeit im Druckstollen ihr erstes Minimum erreicht.

Die Schwingung des Wasserspiegels, die im Schacht durch das plötzliche Schliessen hervorgerufen wird, haben wir in Abschnitt IV B bis zum Minimum von w, das demjenigen von W entspricht, berechnet. Setzen wir den Anfang unserer neuen Zeitskala in den Augenblick des plötzlichen Wiederöffnens der Abschlussorgane, so erhalten wir die Anfangsbedingungen

$$(19) \quad \left.\begin{aligned} z &= z_w \\ w &= w_w = -\sqrt{z_w} \end{aligned}\right\} \text{ für } t = 0$$

Der weiteren Berechnung legen wir nun das fiktive Wasserschloss von Gardel mit verschwindender Schachtfläche und unendlich grosser Fläche der unteren Kammer zu Grunde. Es wird daher angenommen, die Decke der idealisierten Kammer befinde sich im Schwerpunkt der projektierten wirklichen Kammer, d. h. um M_u (> 0) unterhalb des minimalen Ruhewasserspiegels. Die Integrationen müssen hier in zwei Schritten vorgenommen werden:

1. Schritt: $w < 0$. (1) wird zu

$$(20) \quad dt = \frac{dw}{m_u + w^2} \quad \text{mit} \quad m_u = \frac{M_u}{P_0}$$

Integriert man diesen Ausdruck unter Berücksichtigung von (19), so folgt

$$(21) \quad w(t) = \sqrt{m_u}\,\frac{w_w + \sqrt{m_u}\,\mathrm{tg}\,\sqrt{m_u}\,t}{\sqrt{m_u} - w_w\,\mathrm{tg}\,\sqrt{m_u}\,t}$$

Aus dieser Gleichung ergibt sich, dass $w = 0$ wird für

$$t = t_0 = \frac{1}{\sqrt{m_u}}\,\mathrm{arctg}\left(-\frac{w_w}{\sqrt{m_u}}\right)$$

Wir berechnen nun nach (15) die relative Wassermenge c_{u1}, die aus dem Wasserschloss austritt bis zum Zeitpunkt t_0

$$c_{u1} = \int_0^{t_0} (w - 1)\,dt \quad \text{oder}$$

$$(22) \quad c_{u1} = -\frac{1}{2}\ln\left(1 + \frac{w_w^2}{m_u}\right) - \frac{1}{\sqrt{m_u}}\,\mathrm{arctg}\left(-\frac{w_w}{\sqrt{m_u}}\right)$$

2. Schritt: $0 < w \leqslant 1$

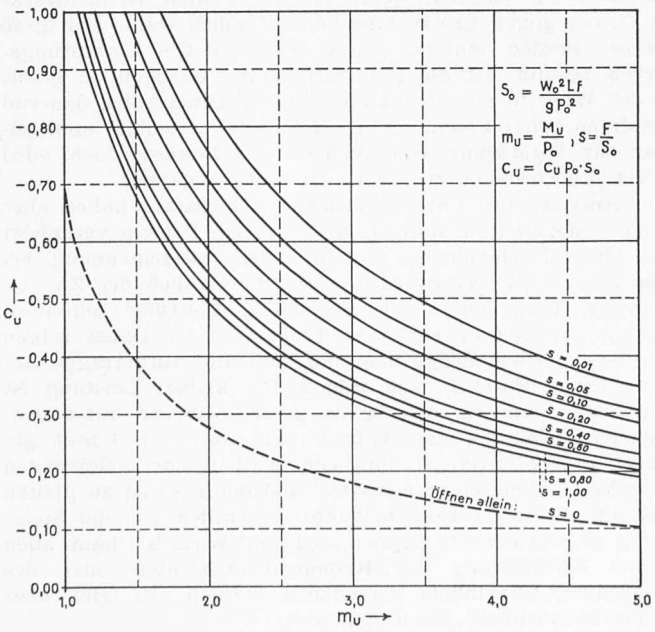


Bild 6. Diagramm für das relative Volumen c_u der unteren Kammer (für totales Schliessen mit totalem Wiederöffnen im ungünstigsten Augenblick)

Da für diesen Schritt die Anfangswerte $w(t_0) = 0$, $z(t_0) = -m_u$ lauten, ist sofort ersichtlich, dass der zweite Beitrag c_{u2}, d. h. die relative Wassermenge, die aus dem Wasserschloss austritt, zwischen dem Zeitpunkt, da w das Vorzeichen wechselt, und demjenigen, da z sein Minimum erreicht, genau demjenigen c entspricht, das Gardel im Falle plötzlichen Oeffnens vom Ruhezustand aus erhält. Es ist daher (vgl. [2])

$$(23) \quad c_{u2} = \frac{\sqrt{m_u} + 1}{2\sqrt{m_u}}\ln\frac{\sqrt{m_u}}{\sqrt{m_u} + 1} + \frac{\sqrt{m_u} - 1}{2\sqrt{m_u}}\ln\frac{\sqrt{m_u}}{\sqrt{m_u} - 1}$$

und

$$(24) \quad c_u = c_{u1} + c_{u2}$$

Die Auswertung von (24) geschieht mit Hilfe der Gleichungen (5), (12), (13), (22) und (23). Es ist zu beachten, dass c_u negativ wird, weil das berechnete Wasservolumen aus dem Wasserschloss austritt. Die durch (24) definierte Kurvenschar ist mit s als Parameter in Bild 6 graphisch dargestellt.

F) Beispiele und Schlussfolgerungen

Als Beispiel einer Anwendung der Diagramme für c_o und c_u seien die erforderlichen Volumina der Kammern des Wasserschlosses Bärenburg approximiert. Gegeben sind dabei die folgenden Grunddaten:

$Q_0 = 80\,\mathrm{m^3/s}$	$L = 3350\,\mathrm{m}$	$f = 24{,}65\,\mathrm{m^2}$
$Z_M = 1401{,}00\,\mathrm{m}$ ü. M.	$Z_m = 1372{,}00\,\mathrm{m}$ ü. M.	$A = 0{,}347$
		$F = 65\,\mathrm{m^2}$

Aus diesen Grössen berechnen sich nach den Definitionsformeln

$P_0 = 3{,}66\,\mathrm{m}$ $\quad S_0 = 6620\,\mathrm{m^2}$ $\quad s = 0{,}01$

Obere Kammer. Es wird angenommen, dass der Schwerpunkt der maximalen Wassermenge, die sich in der oberen Kammer befinden kann, 2,50 m über dem Boden, d. h. auf Kote 1408,30 m ü. M. liegt [4]); damit wird $M_o = 7{,}30$ m und $m_o = 1{,}99$. Mit diesen Werten für m_o und s_0 geht man in das Diagramm für c_o (Bild 5) und erhält $c_o = 0{,}19$. Das Volumen C_o beträgt damit 4600 m³. Rechnet man diese Wassermenge auf Grund der genaueren Methode mit der elektronischen Maschine nach, so erhält man 4700 m³. Die Uebereinstimmung der nach den beiden Verfahren berechneten Volumina ist nicht durchwegs so gut wie in diesem Falle; die Abweichungen betragen jedoch selten mehr als 10 %, und zwar sind die mit der überschlägigen Methode ermittelten Inhalte immer etwas zu klein (ausser bei Differentialkammern).

Untere Kammer. Der Schwerpunkt der unteren Kammer wird auf Kote 1354,60 m ü. M. angenommen. Es ist somit $M_u = 18{,}00$ m und $m_u = 4{,}92$. Aus dem Diagramm (Bild 6) folgt $c_u = 6{,}35$ und schliesslich $C_u = 8500$ m³ gegenüber 6700 m³ bei der genaueren Berechnung. Die nach der überschlägigen Methode berechneten Inhalte sind im allgemeinen um 20 bis 30 % grösser als die nach dem genaueren Verfahren ermittelten. Diese relativ grossen Abweichungen erklären sich einerseits aus dem ins Gewicht fallenden Unterschied zwischen den beiden massgebenden Bedingungen b und b', sowie anderseits aus der Vernachlässigung des Einflusses des Schachtquerschnittes vom Augenblick des Wiederöffnens an. Es sei hierzu bemerkt, dass die Abweichungen noch grösser als 30 % des zu approximierenden Wertes werden können, wenn während der Schwingung der Wasserspiegel in die obere Kammer gerät. Dies ist vor allem in Anlagen möglich, bei denen der maximale und der minimale Stauspiegel nahe beieinander liegen.

Zum Vergleich ist im Diagramm für c_u (Bild 6) auch das nach Gardel ermittelte relative Volumen der unteren Kammer in Funktion von m_u dargestellt für ein totales plötzliches Oeffnen von $Q = 0$ auf $Q = Q_0$. Auf Grund dieser Kurve ergäbe sich für das Wasserschloss Bärenburg ein Inhalt C_u der unteren Kammer von 3000 m³.

[4]) Bei einer Differentialkammer ist die Kote des Ueberlaufes als Schwerpunkthöhe einzuführen.

Schliesslich geht aus den Vergleichen zwischen den approximativen und den genau berechneten Volumina hervor, dass bei der Bemessung der oberen Kammer deren Inhalt das überschlägig ermittelte C_o um 10 bis 20 % übertreffen muss, damit die notwendige Raumreserve vorhanden ist. Hingegen kann bei der Dimensionierung der unteren Kammer das mit Hilfe des Diagrammes (Bild 6) ermittelte C_u oder sogar ein um 10 % kleinerer Wert als Kammervolumen angenommen werden, da die Berechnungsannahmen und die getroffenen Idealisationen schon eine angemessene Reserve schaffen.

Literaturverzeichnis

[1] *F. Vogt:* Berechnung und Konstruktion des Wasserschlosses. Stuttgart 1923, Ferdinand Enke.

[2] *A. Gardel:* Chambres d'équilibre. Lausanne 1956, F. Rouge & Cie S. A.

[3] *A. Gardel:* Vereinfachte Berechnung von Wasserschlössern, «Schweizerische Bauzeitung» 1957, Heft 31, S. 485.

[4] *J. Frank:* Nichtstationäre Vorgänge in den Zuleitungs- und Ableitungskanälen von Wasserkraftanlagen. Berlin, Göttingen, Heidelberg 1957, Springer-Verlag.

[5] *G. Evangelisti:* Sopra la stabilità dei sistemi complessi di gallerie in pressione e pozzi piezometrici, «Energia Elettrica» 1955.

Das Problem des Riemenantriebes und seine Lösung

Von Prof. **A. Leyer**, ETH, Zürich

DK 621.852

Die massgebenden theoretischen Gesichtspunkte

Von allen Antrieben ist der Riemenantrieb weitaus der gebräuchlichste. Es gibt sozusagen keinen Betrieb, in dem nicht eine Anzahl Riemen laufen. Es muss aber auch gesagt werden, dass es kaum einen Betrieb gibt, in dem man mit den Leistungen des Riemenantriebes wirklich zufrieden ist. Die eigentliche Ursache seines Versagens ist seine Undurchschaubarkeit. Trotz seiner scheinbaren Einfachheit weiss man nicht, was wirklich in ihm vorgeht.

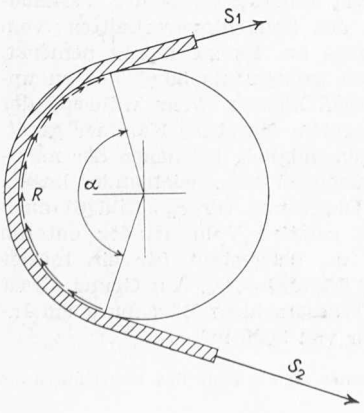
Der Riemenantrieb beruht auf dem Phänomen der Reibung, einem jener Vorgänge, die bis heute am wenigsten erforscht sind. Alle mit der Materie vertrauten Fachleute sind sich darüber einig, dass man nach allem, was die Reibungsforschung bisher geleistet hat, erst am Anfang steht. Die Formel:

$$R = \mu \cdot N$$

ist ein einfacher Rechnungsansatz für ein äusserst verwickeltes Geschehen, das von einer Reihe von Umständen beeinflusst wird, von denen einige nicht einmal rational erfassbar sind. Die üblichen Werte des Reibungskoeffizienten μ liegen zwischen 0,2 und 0,5; man hat aber auch schon solche von 2,5 gemessen, ohne dass es möglich gewesen wäre, genaue Gründe für das Auftreten dieser Extreme anzugeben. Dieser schwierige Sachverhalt legt es nahe, bei seiner Anwendung für den Bau von Antrieben mit der allergrössten Umsicht vorzugehen. Wenn schon die Reibungsverhältnisse wenig durchschaubar sind, so sollte man wenigstens dafür sorgen, dass der Normaldruck N genau festgelegt und den Betriebsbedingungen sorgfältig angepasst wird.

Beim Bandantrieb ist für den Normaldruck die Initialspannung S_1 im schlaffen Riementrum massgebend, Bild 1. Von ihr hängt es ab, welchen Höchstwert die Reibung R zwischen Riemen und Scheibe erreichen kann und wie gross dementsprechend die vom Antrieb übertragbare Umfangskraft ist. Der Zusammenhang ist durch die Eytelweinsche Gleichung gegeben

$$R = (e^{\mu\alpha} - 1)\, S_1$$



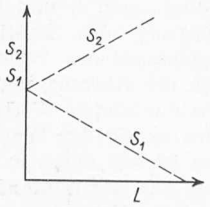


Bild 2. Verlauf der Bandzüge S_1 und S_2 in Abhängigkeit vom Drehmoment oder von der Leistung L

Bild 1 (links). Aufbau des Bandzuges S_2 aus S_1 durch auftretende Reibung an der Kontaktfläche

Wesentlich für unsere Ueberlegung ist, dass zwischen R und S_1 direkte Proportionalität besteht. Die Initialspannung S_1 sollte daher mit der Belastung des Antriebs zu- und abnehmen; bei Leerlauf kann sie 0 sein.

Das Unzulängliche der bisherigen Lösungsversuche

Im Lichte der obenerwähnten Forderung können die bisher bekannten Formen des Bandantriebs nicht sehr günstig bewertet werden. Beim Antrieb mit fester Achsdistanz, bei dem der Riemen meist in wenig fachmännischer Art auf die Scheiben gezwängt wird, kennt man die tatsächlich in ihm auftretende Spannung nicht. Bei den Antrieben mit verstellbarer Achsdistanz kann die Spannung zwar eingestellt werden; da es aber kein Verfahren gibt, um sie bequem und genau zu bestimmen, weiss man auch hier nur selten, wie gross die Spannung im Riemen ist. So ist denn die Initialspannung fast immer entweder zu klein oder zu gross. Im einen Fall kommt der Antrieb unter Belastung zum Gleiten, im andern stehen die kraftführenden Teile ständig unter zu hoher Beanspruchung. Die Auswirkungen dieser Sachlage dürfen nicht gering veranschlagt werden. Zunächst bedeutet ein Gleiten des Riemens Produktionsverlust. Eine Drehbank, deren Riemen gleitet, gerade wenn grosse Zerspanungsarbeit geleistet werden soll, ist nie voll ausgenützt. Gleiten bedeutet aber auch ein Umsetzen von mechanischer Energie in Zerstörungsarbeit, die hauptsächlich am Riemenwerkstoff geleistet wird. Eine sinnlosere Verwendung für hochwertige Energie lässt sich nicht denken. Dabei ist die damit verbundene Erwärmung fast noch schädlicher als der direkte mechanische Angriff, denn es gibt keinen Riemenwerkstoff, der gegen Erwärmung unempfindlich wäre. Auf diese Weise werden laufend grosse Beträge für Zerstörungsarbeit bezahlt. Ist die Riemenspannung dagegen zu gross, leiden Welle und Lager und auch der Riemen selbst dauernd unter zu hoher Spannung. Es kommt zwar selten unmittelbar zur Zerstörung von Wellen oder Lagern, doch wird deren Lebensdauer zweifellos stark herabgesetzt.

Antriebe mit unveränderlicher Achsdistanz haben aber noch einen andern Mangel, der in ihrem Prinzip verankert ist: die unvermeidliche Abnahme der Initialspannung bei zunehmender Umfangskraft. Während nämlich der Zug im straffen Trum (S_2) mit steigender Leistung zunimmt, nimmt der Zug im schlaffen Trum (S_1) ab. Daher zeigen die beiden Riemenzüge über der Leistung aufgetragen ungefähr den Verlauf nach Bild 2. Bei kleiner Leistung ist die Initialspannung ständig zu gross, während mit zunehmender Belastung der Antrieb bald an einen Punkt gelangt, wo die Initialspannung zum Aufbau einer genügenden Nutzkraft nicht mehr ausreicht und der Riemen zu gleiten beginnt. Diese Gleitgrenze hängt wesentlich von der Spannung ab, mit der der Riemen aufgelegt wird. Sie kann auch durch Veränderung des Reibungskoeffizienten oder des Umschlingungswinkels verschoben werden. Es gibt aber keine Möglichkeit, sie aufzuheben.

Man könnte versucht sein, in diesem Umstand ein Mittel gegen Ueberlastung des Antriebes zu erblicken, doch darf nicht übersehen werden, dass eine solche Leistungs-