

Zeitschrift: Schweizerische Bauzeitung
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 99/100 (1932)
Heft: 17

Artikel: Die Berechnung rotierender Radscheiben mittels konischer Teilringe
Autor: Keller, Curt
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-45482>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 01.04.2025

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

INHALT: Die Berechnung rotierender Radscheiben mittels konischer Teilringe. — Das Rheinkraftwerk Ryburg-Schwörstadt. — Der junge Maschinen-Ingenieur in der Praxis. — Erweiterungsbau des Warenhauses Brann und Umbau des Pfautheaters in Zürich (mit Tafeln 11 und 12). — Mitteilungen: Selbstansaugende Sulzer-Kreiselpumpe für Schiffsanlagen. Der Turm des Maschinen-Laboratoriums an der E. T. H. Internation. Vereinigung für Brückenbau und Hochbau, Kongress in Paris vom 19. bis

25. Mai. Eidg. Techn. Hochschule. Die Waterloo-Brücke in London. Neuartige Anordnung der Turbinen eines Niederdruckwasserkraftwerkes. Der neue Bahnhof Chiasso. „Tiefhäuser“ in Erdbebengebieten. Schweizerischer Elektrotechnischer Verein. — Nekrologe: Heinrich E. Mezger. Prof. Dr. Josef Popp. — Literatur. — Schweiz. Verband für die Materialprüfungen der Technik. — Mitteilungen der Vereine. — Sitzungs- und Vortrags-Kalender.

Band 99

Der S. I. A. ist für den Inhalt des redaktionellen Teils seiner Vereinsorgane nicht verantwortlich. Nachdruck von Text oder Abbildungen ist nur mit Zustimmung der Redaktion und nur mit genauer Quellenangabe gestattet.

Nr. 17

Die Berechnung rotierender Radscheiben mittels konischer Teilringe.

Von Dipl. Ing. CURT KELLER, Escher Wyss Maschinenfabriken A.-G.

Die mit hohen Drehzahlen rotierenden Radscheiben von Dampf- oder Gasturbinen und Turbokompressoren gehören zu den höchstbeanspruchten Konstruktionselementen von Turbomaschinen. Für die sich daher zu ihrem Entwurf als notwendig erweisende Vorausberechnung maximal auftretender Spannungen infolge Fliehkraftwirkung der Schaufeln und Eigenmasse der Scheibe sind verschiedene Verfahren entwickelt worden.¹⁾ Die exakte Lösung der Differentialgleichung, die dieses Spannungsproblem beherrscht, ist jedoch nur für einige wenige Spezialprofile anzuwenden, von denen die im praktischen Maschinenbau verwendeten Profile meist abweichen.

Die bisher wohl bekannteste Rechnungs-Methode (Donath-Grammel) ersetzt daher näherungsweise das allgemeine Scheibenprofil möglichst eng durch eine grössere Zahl von Kreisringen gleicher Dicke (Abb. 1b), die von innen nach aussen fortschreitend sukzessive gerechnet werden und damit näherungsweise den Spannungsverlauf über die ganze Scheibe liefern.

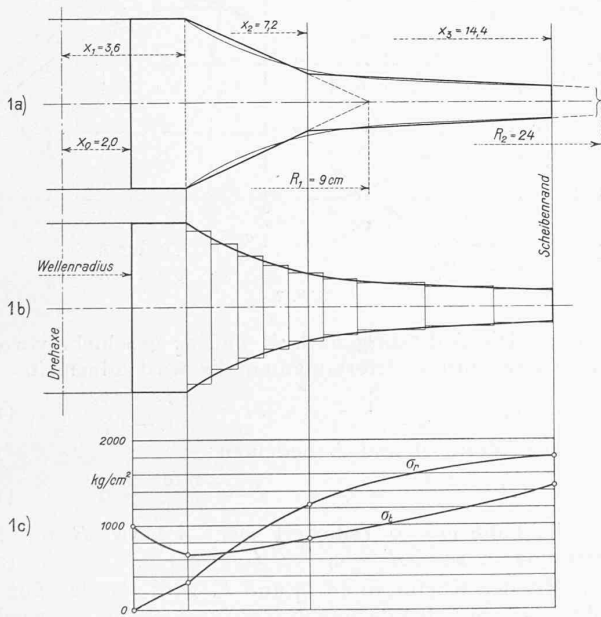


Abb. 1.

Ein neues, ebenfalls sehr einfaches analytisches Verfahren bildet die Näherungsrechnung eines beliebigen Radprofils mittels konischer Teilringe (z. B. Abb. 1a — Die Unterteilung in nur zwei Elemente ist hier mit Rücksicht auf deutliche zeichnerische Darstellung des Rechnungsganges geschehen —). Die Wahl von Konus-Elementen an Stelle der Teilscheiben gleicher Dicke bietet den Vorteil einer bessern Näherung an das wirkliche Radprofil trotz einer bedeutend kleinern Anzahl von Teilelementen und damit Rechnungstufen. Zudem ist keine sprunghafte Aenderung des Querschnittes des Ersatzprofils und damit des gerechneten Spannungsverlaufes vorhanden.

¹⁾ Dr. Huldreich Keller, Schweiz. Bauzeitung Bd. 54, S. 307 (27. Nov. 1909). Dr. E. Honegger, Zeitschrift für angew. Mathematik und Mechanik. Bd. 7, Nr. 2, Jahrg. 1927, ferner Methode Donath-Grammel in „Dampf und Gasturbinen“ von Stodola. 6. Auflage.

Der früher detailliert entwickelte neue Rechnungs-gang²⁾ lässt sich durch geeignete mathematische Umformung noch weiter vereinfachen, sodass — wie im folgenden zusammenfassend gezeigt werden soll — die genaue Berechnung beliebiger Radprofile für praktische Zwecke auf ein Minimum an Rechnerarbeit ohne Einbusse an Genauigkeit reduziert werden kann.

Es bedeuten im folgenden wie in der ursprünglichen Entwicklung die Bezeichnungen:

$E = 2,1 \cdot 10^6$ kg/cm², Elast.-Modul des Scheibenmaterials.
 $\nu = 0,3$ Querkontraktions-Koeffizient.

$$E^* = \frac{E}{1-\nu^2} = 2,308 \cdot 10^6 \text{ kg/cm}^2.$$

$\gamma = 7,86 \cdot 10^{-3}$ kg/cm³ Spez. Gewicht des Scheibenmaterials.

$\mu = 8,01 \cdot 10^{-6}$ kg/cm⁻⁴ sec² Spez. Masse.

x = Abstand eines Punktes von der Axe in cm.

y = Dicke der Scheibe im Abstand x in cm.

ξ = radiale Verschiebung eines Punktes in cm.

R = Abstand von der Axe in cm, für den die Teilscheibendicke $y = 0$ wird.

t = dimensionslose Ersatzvariable für x , dadurch gekennzeichnet, dass für $x = 0$, $t = 0$, für $x = R$, $t = 1$ oder $t = x/R$.

\cdot = Ableitung nach t , $'$ = Ableitung nach x .

Index 100 (z. B. $\xi_{0,100}$) gilt für Scheibe mit $R = 100$ cm.

Es ist ferner:

Ableitung nach $t = R$ mal Ableitung nach x , z. B.

$$\xi \cdot = \xi' \cdot R$$

Für die Radialspannung σ_r und die Tangentialspannung σ_t einer Teilscheibe gilt allgemein:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= \frac{E^*}{R} \left(\xi \cdot + \frac{\nu}{t} \xi \right) \\ \sigma_t &= \frac{E^*}{R} \left(\nu \xi \cdot + \frac{1}{t} \xi \right) \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (1)$$

Die radiale Verschiebung ξ sowie deren Ableitung $\xi \cdot$ lässt sich nun für eine konische Scheibe ausdrücken durch

$$\left. \begin{aligned} \xi &= \xi_0 + K_1 \xi_r + K_2 \xi_r^* \\ \xi \cdot &= \xi_0' + K_1 \xi_r' + K_2 \xi_r'^* \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (2)$$

K_1 und K_2 sind Konstantwerte für einen Konus R und von den Randbedingungen abhängig. Die Grössen ξ_r , ξ_r' , ξ_r^* , $\xi_r'^*$ sind nur Funktionen von t und unabhängig von R oder ω (vergl. Tabelle I). Von R und ω abhängig ist allein ξ_0 bzw. ξ_0' , und zwar gilt:

$$\left. \begin{aligned} \xi_0 &= \xi_{0,100} \left(\frac{R}{100} \right)^3 \left(\frac{\omega}{314} \right)^2 \\ \xi_0' &= \xi_{0,100}' \left(\frac{R}{100} \right)^2 \left(\frac{\omega}{314} \right)^2 R \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (3)$$

Führt man nun die Werte ξ und $\xi \cdot$ der Gleichungen (2) in die Spannungsgleichungen (1) direkt ein, so folgt

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r \frac{R}{E^*} &= \left(\xi_0' + \frac{\nu}{t} \xi_0 \right) + K_1 \left(\xi_r' + \frac{\nu}{t} \xi_r \right) + K_2 \left(\xi_r'^* + \frac{\nu}{t} \xi_r^* \right) \\ \sigma_t \frac{R}{E^*} &= \left(\nu \xi_0' + \frac{1}{t} \xi_0 \right) + K_1 \left(\nu \xi_r' + \frac{1}{t} \xi_r \right) + K_2 \left(\xi_r'^* \nu + \frac{1}{t} \xi_r^* \right) \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (4)$$

²⁾ Erstmals beschrieben in der Stodola-Festschrift 1929, C. Keller: „Beitrag zur analytischen Berechnung hochbelasteter Radscheiben“, und Escher Wyss-Mitteilungen Nr. 1, Jahrgang 1929.

Berücksichtigt man weiter den durch die Formeln (3) gegebenen Zusammenhang so lassen sich die ersten Klammerausdrücke schreiben zu:

$$\left. \begin{aligned} (\xi_0 + \frac{\nu}{t} \xi_0) &= (\xi_{0,100}' + \frac{\nu}{100t} \xi_{0,100}) \left(\frac{R}{100}\right)^2 \left(\frac{\omega}{314}\right)^2 R \\ (\nu \xi_0 + \frac{1}{t} \xi_0) &= (\nu \xi_{0,100}' + \frac{1}{100t} \xi_{0,100}) \left(\frac{R}{100}\right)^2 \left(\frac{\omega}{314}\right)^2 R \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Setzt man diese Werte in Gleichungen (4) ein, so resultiert nach passender Umformung

$$\left. \begin{aligned} \frac{\sigma_r 10^6}{R^2 \omega^2} &= \frac{E^* 10^6}{100^2 314^2} \left(\xi_{0,100}' + \frac{\nu}{100t} \xi_{0,100} \right) \\ &\quad + k_1 \left(\xi_r + \frac{\nu}{t} \xi_r \right) + k_2 \left(\xi_r^* + \frac{\nu}{t} \xi_r^* \right) \\ \frac{\sigma_t 10^6}{R^2 \omega^2} &= \frac{E^* 10^6}{100^2 314^2} \left(\nu \xi_{0,100}' + \frac{1}{100t} \xi_{0,100} \right) \\ &\quad + k_1 \left(\nu \xi_r + \frac{1}{t} \xi_r \right) + k_2 \left(\nu \xi_r^* + \frac{1}{t} \xi_r^* \right) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

oder in abgekürzter Form geschrieben:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\sigma_r 10^6}{R^2 \omega^2} &= \alpha_r + k_1 \beta_r + k_2 \gamma_r \\ \frac{\sigma_t 10^6}{R^2 \omega^2} &= \alpha_t + k_1 \beta_t + k_2 \gamma_t \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Hierin sind

$$k_1 = \frac{K_1 E^* 10^6}{\omega^2 R^3} \quad k_2 = \frac{K_2 E^* 10^6}{\omega^2 R^3} \quad (8)$$

die von zwei Grenzbedingungen abhängigen neuen Konus-Konstantwerte für einen gegebenen Konus.

Die die Klammerausdrücke der Gleichungen (6) repräsentierenden Koeffizienten $\alpha_r, \beta_r, \gamma_r$ und $\alpha_t, \beta_t, \gamma_t$ sind nur Funktionen der dimensionslosen Variablen $t = x/R$. Sie sind für verschiedene t -Werte in Tabelle I zusammengestellt und in Abb. 2 aufgetragen. Diese Werte gelten für die Berechnung von Stahlscheiben mit $E = 2,1 \cdot 10^6 \text{ kg/cm}^2$ und $\nu = 0,3$. Die Rechnungseinheiten für die Grundgleichungen (6) bzw. (7) sind kg, cm, sec. Für beliebige andere Scheibenmaterialien lassen sich die Koeffizienten mit den entsprechenden Grössen ihres Kontraktionskoeffizienten ν und des Elastizitätsmoduls E ebenfalls berechnen.

Für die ruhende Scheibe mit $\omega = 0$ vereinfachen sich die Gleichungen (7), folgernd aus den allgemeinen Gleichungen (4) zu

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r \frac{R}{E^*} &= K_1 \left(\xi_r + \frac{\nu}{t} \xi_r \right) + K_2 \left(\xi_r^* + \frac{\nu}{t} \xi_r^* \right) \\ \sigma_t \frac{R}{E^*} &= K_1 \left(\nu \xi_r + \frac{1}{t} \xi_r \right) + K_2 \left(\nu \xi_r^* + \frac{1}{t} \xi_r^* \right) \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

oder mit entsprechenden Bezeichnungen wie oben zu

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= k_1' \beta_r + k_2' \gamma_r \\ \sigma_t &= k_1' \beta_t + k_2' \gamma_t \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

k_1' und k_2' stellen wieder Konstantwerte für einen Konus dar. Mittels der Gleichungen (10) lässt sich auf einfachste Art der Spannungsverlauf jeder beliebigen sich nach aussen verjüngenden ruhenden Scheibe mit zentraler Bohrung berechnen, wenn die Beanspruchung in der Symmetrie-Ebene des Profils senkrecht zur Axe erfolgt.

Die totale Spannungsberechnung einer rotierenden oder ruhenden Scheibe reduziert sich somit auf die sukzessive Berechnung der einzelnen Ersatz-Konusscheiben mittels der für jeden Konus exakt geltenden linearen Gleichungen (7) bzw. (10). Da diese Gleichungen für σ_r und σ_t eines Teilkonus aus dem exakten Integral der Differentialgleichung für die Formänderung dieser Teilscheibe hervorgehen, ist die Genauigkeit der neuen Rechnungsmethode allein abhängig von der guten Uebereinstimmung von Ersatz- und wirklichem Profil der Scheibe, die jedoch immer mit wenigen Elementen herzustellen ist.

Der Gang einer Scheibenrechnung verläuft nach folgendem Schema: Mit beliebiger Wahl der Innenspannung ($\sigma_r = 0, \sigma_t = a$) liefert die Nabe als Scheibe gleicher Dicke in üblicher Weise die Werte von Radial- und Tangentialspannung für den Anfang $t_1 = x_1/R_1$ des ersten Konus. Mit $\omega = \omega$ -Betrieb ergeben sich gemäss Gleichungen (7) die zwei Konuskonstanten k_1 und k_2 , wobei für die Koeffizienten α, β, γ die Werte geltend für $t = t_1$ der Tabelle I bzw. den entsprechenden Kurven entnommen

Tabelle I gültig für $E = 2,1 \cdot 10^6 \text{ kg/cm}^2 \quad \nu = 0,3$.

t	α_r	β_r	γ_r	α_t	β_t	γ_t
0	∞	1	$-\infty$	∞	1,300	∞
0,05	1,371	1,352	-124,630	1,359	1,336	133,930
0,10	1,406	1,410	-30,343	1,384	1,375	35,480
0,15	1,425	1,474	-13,066	1,402	1,419	16,730
0,20	1,435	1,546	-7,080	1,414	1,466	9,978
0,25	1,435	1,627	-4,345	1,420	1,516	6,779
0,30	1,422	1,721	-2,876	1,418	1,575	4,988
0,40	1,360	1,948	-1,440	1,395	1,713	3,150
0,50	1,250	2,266	-0,797	1,344	1,894	2,249
0,60	1,093	2,736	-0,456	1,265	2,144	1,747
0,70	0,889	3,513	-0,260	1,160	2,533	1,407
0,75	0,772	4,152	-0,183	1,098	2,826	1,293
0,80	0,641	5,054	-0,136	1,030	3,225	1,189
0,85	0,498	6,275	-0,091	0,956	3,764	1,104
0,90	0,342	9,621	-0,055	0,870	5,020	1,029
0,95	0,232	18,715	-0,025	0,781	8,240	0,966
1,00	0,204	∞	0	0,685	∞	0,910

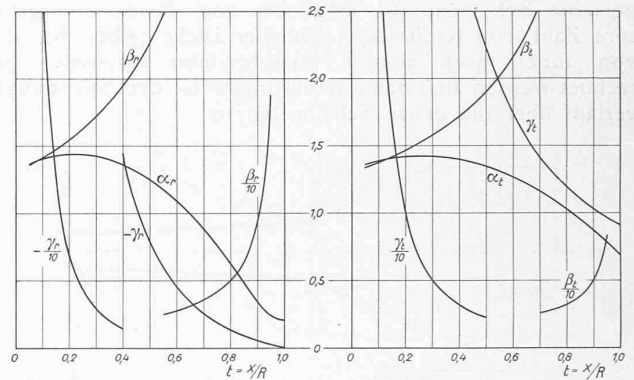


Abb. 2.

werden. Die Auflösung nach k_1 und k_2 geschieht vorteilhafterweise mittels Determinanten. Es wird allgemein

$$k_1 = \frac{A \gamma_t - B \gamma_r}{\beta_r \gamma_t - \beta_t \gamma_r} \quad k_2 = \frac{B \beta_r - A \beta_t}{\beta_r \gamma_t - \beta_t \gamma_r} \quad (11)$$

Die Werte A und B bedeuten:

$$A = \frac{\sigma_r 10^6}{R^2 \omega^2} - \alpha_r \quad B = \frac{\sigma_t 10^6}{R^2 \omega^2} - \alpha_t \quad (12)$$

Im Falle $\omega = 0$ reduziert sich A bzw. B für die Determinante zu $A' = \sigma_r \quad B' = \sigma_t$.

Mit den Koeffizienten k_1 und k_2 wird für das Konusende $t = t_2$ mit den dazugehörigen α, β, γ -Werten wieder nach Gleichungen (7) die Spannungen σ_r und σ_t an dieser Stelle ermittelt. Diese bilden zugleich die Grenzbedingungen für den nächsten Konus, für den sich obiges Rechenschema wie für alle weiterfolgenden genau wiederholt.

Eine zweite totale Durchrechnung der Scheibe mit beliebig gewählten Innenspannungen und $\omega = 0$ mit Hilfe der Gleichungen (10) für jeden Hilfskonus liefert Kranzspannungen, die in bekannter Weise mit den Randwerten des ersten Rechnungsganges so superponiert werden, dass die Randbedingung am Scheibenkranz erfüllt ist.

Die für die Berechnung massgebenden Formelbeziehungen sind zur Vermeidung von Rechenfehlern so gegeben, dass bei Verwendung von kg, cm und sec als Masseinheit die auftretenden Konstanten und Koeffizienten übersichtliche und einfache Zahlenwerte haben (vergl. Tab. I).

Das folgende Beispiel zeigt die Einfachheit des Rechnungsganges für einen Konusring. Die ()-Zahlen deuten auf die zur Berechnung verwendeten Gleichungen.

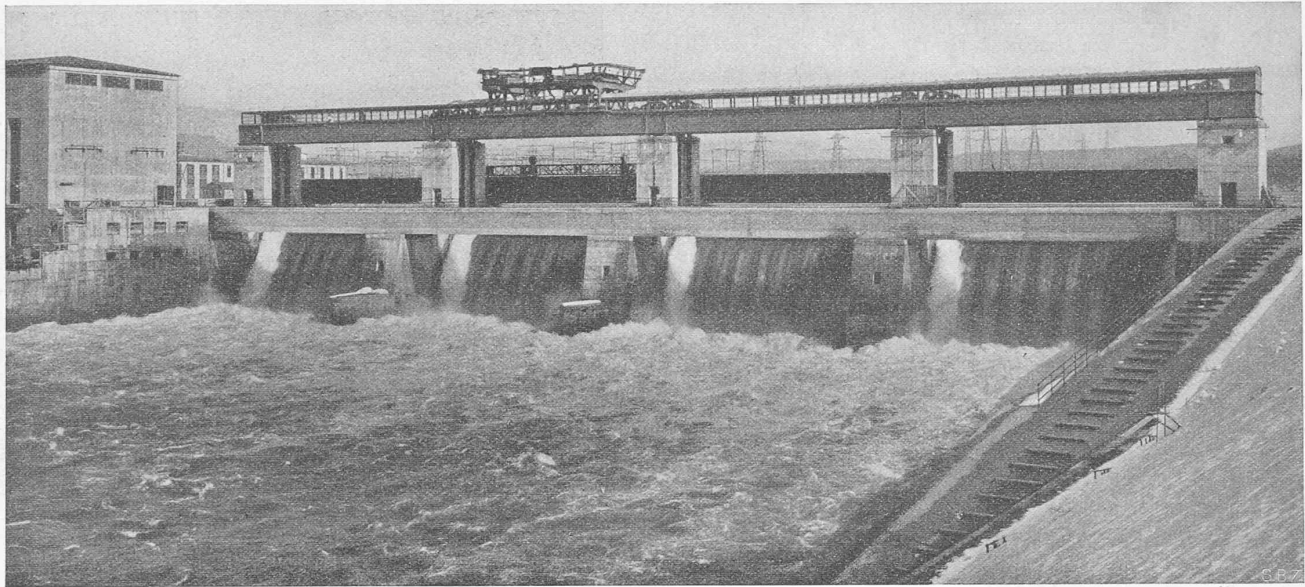


Abb. 8. Unterwasserseitige Ansicht des Stauwehrs, vom schweizerischen Ufer aus. Links das Maschinenhaus, rechts die Kahnrampe.

Stahlscheibe nach Abb. 1 $n = 3000$, $\omega = 314$. Aus $\sigma_r = 0$ und $\sigma_t = 1500$ als Innenspannung liefert die Nabe als Scheibe gleicher Dicke für $x_1 = 3,6$, $\sigma_r = 514$, $\sigma_t = 970$.

Konus I nach Abb. 1a: $R = 9$ $R^2 \omega^2 = 7,99 \cdot 10^6$. Zum Anfang $t_1 = x_1/R = 0,4$ gehören die Koeffizienten $\alpha_r = 1,360$ $\beta_r = 1,948$ $\gamma_r = -1,440$ } (Tab. I).
 $\alpha_t = 1,395$ $\beta_t = 1,713$ $\gamma_t = 3,150$ }

Die Anfangsspannungen $\sigma_r = 514$ $\sigma_t = 970$ geben nach (12) $A_1 = 63,0$ $B_1 = 137,2$

Daraus mittels Determinanten nach Gl. (11) $k_1 = 46,05$ $k_2 = 18,48$

Mit diesen Konstanten am Konusende $t_2 = 0,8$ und den dazugehörigen Koeffizienten

$\alpha_r = 0,641$ $\beta_r = 5,054$ $\gamma_r = -0,136$
 $\alpha_t = 1,030$ $\beta_t = 3,225$ $\gamma_t = 1,189$

folgen nach Gl. (7) bzw. Gl. (12) die Werte

$$A_2 = 230,3 \quad B_2 = 170,5$$

und daraus sofort die Endspannungen

$$\sigma_r = 1842 \quad \sigma_t = 1370$$

Für die $\omega = 0$ Rechnung wird mit der Wahl $\sigma_r = 0$ $\sigma_t = 1000$ als Nabenspannung für den selben Konus I die Anfangsspannung $\sigma_r = 364$ $\sigma_t = 654$. Mit den gleichen Koeffizienten für t_1 wie oben

$$A_1 = \sigma_r = 364 \quad B_1 = \sigma_t = 654 \quad (13)$$

die Konuskonstanten

$$k_1' = 236,0 \quad k_2' = 79,0 \quad (11)$$

woraus sich seine Endspannungen sofort ergeben zu

$$\sigma_r = 1181 \quad \sigma_t = 856 \quad (10)$$

Für den Konus II folgt nach dem selben Schema:

1. Rechnung $\omega = \omega$ Betrieb $R_2^2 \omega^2 = 56,8 \cdot 10^6$

Für $t_1 = 0,3$ $A = 31,0$ $B = 22,7$
 $k_1 = 16,88$ $k_2 = -0,074$

Daraus für $t_2 = 0,6$ $\sigma_r = 2690$ $\sigma_t = 2124$

2. Rechnung $\omega = 0$

Für $t_1 = 0,3$ $A = \sigma_r = 1181$ $B = \sigma_t = 856$
 $k_1' = 642$ $k_2' = -29,6$

Daraus für $t_2 = 0,6$ $\sigma_r = 1768$ $\sigma_t = 1325$

Ist nun die spezifische Randbeanspruchung durch die Schaufeln z. B. $\sigma_r = 1800$ kg/cm², so ermittelt sich in bekannter Weise nach Mises die Superpositionskonstante m aus

$$\sigma_{r, \text{eff}} = \sigma_r + m \sigma_r$$

mit den Zahlen des Beispiels zu $m = \frac{1800 - 2690}{1768} = -0,504$.

Für jeden Punkt der Scheibe gilt dann:

$$\sigma_{r, \text{eff}} = \sigma_{r, \omega} + m \sigma_{r, 0} \quad \sigma_{t, \text{eff}} = \sigma_{t, \omega} + m \sigma_{t, 0}$$

woraus sich aus den zwei Rechnungsgängen der wahre Spannungsverlauf der Scheibe ergibt (Abb. 1c).

Das Rheinkraftwerk Ryburg-Schwörstadt.

Mitgeteilt von der MOTOR-COLUMBUS

A.-G. für elektrische Unternehmungen in Baden (Schweiz).

IV. DAS STAUWEHR.

(Forts. von Seite 202.)

Baulicher Teil.

Das Stauwehr (Abb. 8 bis 12), ist ein Schützenwehr mit 111 m Breite zwischen den Endwiderlagern und vier Öffnungen von je 24 m lichter Weite bei vorläufig 12 m Schützenhöhe. Die feste Wehrschwelle liegt oberwasserseits ungefähr auf der Höhe der Felssohle des Flusses und geht dann in den um 2 m tiefer liegenden Sturzboden auf der Unterwasserseite über, der so eine ausreichende Wasserüberdeckung erhält. Die Wehrschützen sind so nahe wie zugänglich an die oberwasserseitige Flucht der Wehrschwelle herangerückt, um mit einer möglichst geringen Breite der kostspieligen Wehrschwelle auszukommen.

Durchgehende Betonsporne am obern und untern Ende der Wehrschwelle, die an der Oberwasserseite auf 7 m und an der Unterwasserseite auf 10 m Tiefe in den Felsen eingreifen, schützen das Wehr gegen die Folgen von Sog im Oberwasser und von Kolkungen im Unterwasser; sie erschweren ausserdem ein Durchsickern von Wasser unter dem Wehr hindurch. Am untern Ende des Sturzbodens ist auf Grund der Modellversuche die schon erwähnte Rehbock'sche Zahnschwelle eingebaut, die das Entstehen schädlicher Kolke unmittelbar unterhalb der Wehrschwelle verhindern soll. Mit Rücksicht auf die nach den Modellversuchen zu erwartende Kolkaustrahlung sind die Ufermauern und der Trennpfeiler unterhalb des Wehres entsprechend tief gegründet worden.

Die Wehrpfeiler weisen eine Stärke von 5 m auf; mit Rücksicht auf eine gute Wasserführung sind die oberwasserseitigen Pfeilervorköpfe abgerundet, die unterwasserseitigen zugespitzt. Die untern, vom Geschiebe bestrichenen Teile der Pfeiler und der Widerlager, sowie die später nicht mehr zugänglichen, ausserhalb der oberwasserseitigen Notverschlüsse liegenden Pfeilervorköpfe und die Wehrschwelle mit dem Sturzboden sind mit Urner Granit verkleidet worden; auch die Zahnschwelle besteht aus diesem Material. Verschiedene Kanten und Flächen der Schützen- und Notverschlussnischen, die dem Angriff von Wasserwirbeln stark ausgesetzt sind, wurden durch Eisenverkleidungen geschützt.

Wehrpfeiler und Wehrschwelle sind unter Annahme eines 80-prozentigen Auftriebes bemessen worden; die Wehrschwelle hat deshalb eine Bewehrung erhalten.