

Zeitschrift: Schweizerische Bauzeitung
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 87/88 (1926)
Heft: 13

Artikel: Vom Wirkungsgrad der Wasserturbinen
Autor: Pfau, Arnold
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-40963>

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: 05.02.2025

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

INHALT: Vom Wirkungsgrad der Wasserturbinen. — Die baulichen Anlagen des Kraftwerkes Partenstein. — Wettbewerb für die Gewerbeschule und das Kunstgewerbe-Museum Zürich. — Eidgenössisches Amt für Wasserwirtschaft. — Nekrologie: Willy Schreck. — Miscellanea: Zweistöckige Eisenbahnwagen. Der Schweizerwoche-Verband. Eidgenössische Technische Hochschule. Internationale Verständigung

über Materialprüfungen der Technik. Deutsche Studiengesellschaft für Automobilstrassenbau. Der Internationale Brückenbaukongress an der E. T. H. Elektrifikation der Berliner Stadt- und Ringbahn. — Konkurrenzen: Limmatwerk Wettingen der Stadt Zürich. — Literatur. — S. T. S.

Band 88. Nachdruck von Text und Abbildungen ist nur mit Zustimmung der Redaktion und nur mit genauer Quellenangabe gestattet.

Nr. 13

Vom Wirkungsgrad der Wasserturbinen.

Von ARNOLD PFAU, Consulting Engineer der Wasserturbinen-Abteilung von Allis-Chalmers Mfg. Co., Milwaukee, Wis., U. S. A.

Man hört und liest in letzter Zeit so viel Schönes über Wirkungsgrade von Francis-, Propeller-, Kaplan- und Löffelrad-Turbinen, dass eine kleine Rundschau vielleicht von Interesse sein dürfte, und im Anschluss an diese auch eine Ueberlegung, wie weit es sich noch lohnt, den Wirkungsgrad „hinaufzuschrauben“.

Im Anfang der 90er Jahre war man in Europa allgemein mit einem Wirkungsgrad von 75% zufrieden, sowohl für Reaktionsturbinen als auch für Löffelradturbinen. Warum dies nicht 74 oder 76% war, dürfte seinen Grund mit darin haben, dass die Faustregel $N = QH$ eben auf der Annahme eines Wirkungsgrades von 75% beruhte.

Als dann die Amerikaner den Typenbau einführten und ihre Modelle in der Versuchsanstalt Holyoke, Mass. ausprobierten, stiegen die Wirkungsgrade auf Werte über 80%, sodass es keineswegs gewagt erschien, dort einen allgemeinen Wirkungsgrad von 80% als Garantie-Grundlage anzunehmen. Wiederum nicht 79 oder 81%, sondern 80%, weil die auf dem englischen Masssystem aufgebaute, einfache Formel $N = QH/11$ eben einen Wirkungsgrad von 80% in sich schloss.

Diese kommerzialisierten und auf Lager, d. h. in Normalsätzen gebauten Typen, wie Hercules, Victor, Giant, Mc Cormick, usw., sickerten nach und nach in den europäischen Markt durch, und ich erinnere mich noch lebhaft, wie Ende der 90er Jahre die erste „Hercules-Turbine“ von Singruen Frères in Epinal ihren Einzug in eine Schweizer Fabrikanlage hielt, und wie nach sorgfältiger Bremsung von Seite skeptischer Vertreter einer hervorragenden schweizerischen Turbinenfabrik zugegeben werden musste, dass der Wirkungsgrad tatsächlich grösser als 80% war. Dies gab natürlich der guten, alten 75%-Formel den Todesstoss, und bald wurde selten weniger als 80% garantiert.

Ebenso mussten dann die Wirkungsgrade von Löffelradturbinen erhöht werden, weil es dem genialen Konstrukteur Doble in San Francisco gelungen war, ihn wesentlich zu verbessern. Dieser Erfolg muss nicht so sehr seinem sogen. Ellipsoidal Buckel zugeschrieben werden, als vielmehr seiner Nadeldüsen-Konstruktion, die den Wirkungsgrad des auf den Löffel auftreffenden Strahles erhöhte.

Auch diese Neuerung hat man zuerst etwas belächelt, sie wurde aber seither bei allen Turbinenfabriken heimisch und hat die alte, einen rechteckigen Strahl erzeugende Zungenregulierung gänzlich verdrängt. Wirkungsgrade der Löffelrad-Turbinen von 80 bis 83% konnten so ohne Bedenken als normal adoptiert werden.

Diese Garantiewerte für Francis- und Löffelrad-Turbinen behaupteten dann das Feld für mehrere Jahre, bis ein neuer Vorstoss gemacht wurde, einerseits durch Verbesserung der Löffel, wodurch Wirkungsgrade bis zu 88% erreicht wurden, andererseits durch sorgfältige Durchbildung der Saugrohre der Francisturbinen. Damit wurde der Wirkungsgrad nicht nur mit Bezug auf seine absoluten Werte beträchtlich erhöht, sondern es wurde auch eine grössere Flexibilität desselben unter veränderlichem Gefälle oder Umlaufzahl ermöglicht, indem diese neuen Saugrohr-Konstruktionen eine bessere Ausnützung sowohl der noch vom Laufrade abgebenen kinetischen Energie, als auch der im Wirbel enthaltenen Energie gestatteten, welche letzte in den früheren Krümmern grosse Störungen und Verluste verursachten. Diese Vervollkommnung des Saugrohres trägt auch zum grossen Teil dazu bei, dass mit der Propeller-

oder der Kaplan-Turbine ebenfalls recht günstige Wirkungsgrade erzielt werden können.

So ist nun zur Zeit ein Wirkungsgrad von 90% für Francis-Turbinen nichts aussergewöhnliches mehr. Die eingehenden Proben mit den von der Allis-Chalmers Mfg. Co. gelieferten 70000 PS Niagara-Einheiten haben einen Gesamtwirkungsgrad von 91,2%, mit einem reinen Turbinenwirkungsgrad von 93,8% ergeben. Mit einem Wirkungsgrad von nahezu 94% dürfte aber die praktische Grenze wohl bald erreicht sein. Es dürfte daher an der Zeit sein, auf andere Wege des Fortschrittes zu sinnen.

Man versteht allgemein unter Wirkungsgrad einer Kraftmaschine das Verhältnis zwischen der von der Maschine geleisteten und der ihr zur Verfügung stehenden Energie. Dieser so definierte Wirkungsgrad fusst also auf einer rein technischen Grundlage. Das Bestreben zur Erreichung eines hohen Wirkungsgrades bringt oft Verfeinerungen der Konstruktion mit sich, die die Kraftmaschine komplizierter gestalten, und es werden dabei oft auch Gesichtspunkte ausser Acht gelassen, die zur Erhaltung der Dauerhaftigkeit des Betriebes von grösserer Wichtigkeit sind, als Bruchteile eines Prozentes im Wirkungsgrade.

Durch Zusammenschalten der einzelnen Kraftnetze wird erreicht, dass möglichst wenige, darum aber umso grössere Einheiten angewendet werden können. Damit steigt aber auch die Notwendigkeit, dass solche Einheiten in ununterbrochenem Betriebe bleiben, besonders in solchen Fällen, wo das Betriebswasser nicht aufgespeichert werden kann und daher bei einem Stillstand der Einheit nutzlos über das Wehr abfließt.

Es erscheint daher am Platze, den Begriff „Wirkungsgrad“ etwas weiter auszubauen, d. h. nicht nur vom Standpunkte des Konstrukteurs aus zu betrachten, sondern vom Standpunkte des Bankiers, der mehr auf die Bilanz, als auf eine schöne Wirkungsgradkurve schaut. Wir können dem ohne weiteres Rechnung tragen, wenn wir neben dem Begriff *technischen Wirkungsgrad* noch einen *kommerziellen Wirkungsgrad* einführen. Wir wollen darunter das Verhältnis verstehen zwischen der von der Kraftmaschine für eine bestimmte Zeit, z. B. ein Betriebsjahr tatsächlich abgegebenen und der während dieser Zeit ohne Betriebsunterbruch theoretisch erzielbaren Arbeit.

Bezeichnet η_t den technischen Wirkungsgrad und η_k den kommerziellen Wirkungsgrad, so wäre $\eta_k = \eta_t$, wenn die Einheit während des ganzen Betriebsjahres die verfügbare Energie ausnützen und abgeben könnte. Sobald aber diese Einheit einen Betriebs-Unterbruch erleidet, ist $\eta_k < \eta_t$. Es ist somit klar, dass der neue Begriff kommerzieller Wirkungsgrad die Auskunft liefert, die kommerziell interessiert, indem er die Periode in sich schliesst, während der das Kapital unproduktiv ist. Natürlich müssen in diesem Begriffe auch alle andern Ursachen des Betriebsunterbruches eingeschlossen werden, wie Störungen im wasserbaulichen und im elektrischen Teil. Wir wollen uns aber der Einfachheit halber hier nur auf die Turbine selber beschränken und die vollständige Ausbildung des Begriffes „kommerzieller Wirkungsgrad einer Anlage“ weitem Studien überlassen.

Jeder Betriebsunterbruch einer Turbine zieht folgendes nach sich: 1. Einen Energie-Ausfall L_1 , also einen Einnahmen-Verlust. 2. Eine Geldauslage L_2 zur Bestreitung der Reparaturkosten. 3. Eine weitere Geldauslage L_3 , im Falle die durch

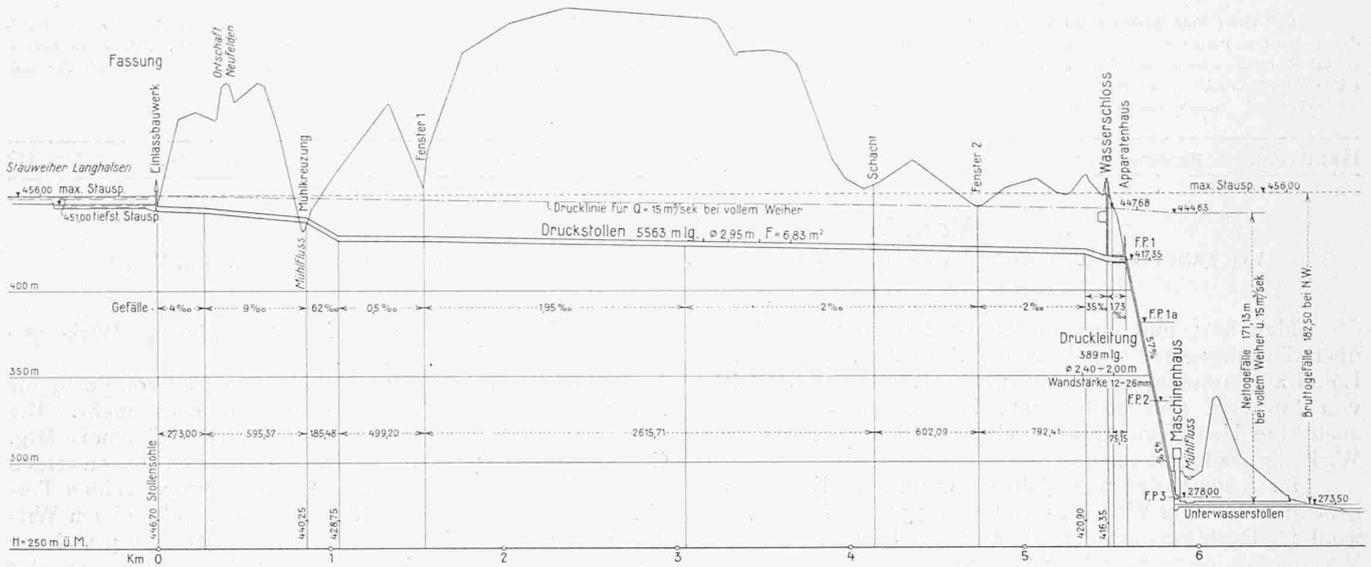


Abb. 2. Längenprofil der Wasserkraftanlage Partenstein an der grossen Mühl. — Masstab der Längen 1 : 40 000, Masstab der Höhen 1 : 4 000.

den Betriebsunterbruch nicht verfügbare Energie auswärts gekauft werden muss, wie dies bei Fabrikanlagen eintritt, die eine eigene Turbinenanlage besitzen.

Alle drei Posten stellen eine Geldsumme dar, oder, auf einen Normalpreis pro kWh umgerechnet, eine entsprechende Anzahl von kWh.

Bedeutet L die verfügbare Arbeit, so ist:

$$\eta_k = \eta_t \frac{L - L_1 - L_2 - L_3}{L}, \text{ oder } = \eta_t \left[1 - \frac{L_1 + L_2 + L_3}{L} \right]$$

Kann die Energie zum selben Preise gekauft werden, wie sie sonst von der Einheit erzeugt wird, dann ist $L_1 = L_3$, somit

$$\eta_k = \eta_t \left[1 - \frac{2 L_1 + L_2}{L} \right]$$

Nehmen wir nun einmal an, die Turbine, z. B. eine Hochdruck-Francisturbine, habe einen technischen Wirkungsgrad von 90%, sie erleide aber einen jährlichen Betriebsunterbruch von drei Wochen, was nicht gerade hoch oder übertrieben ist, wenn man alle kleinen Reparaturen des ganzen Jahres zusammenrechnet. Eine ununterbrochene Leistung von 1 kW während eines Jahres liefert 8760 kWh. Drei Wochen sind 504 kWh. Nehmen wir ferner an, dass die Reparaturkosten L_2 total 5000 Fr. betragen, und dass dies, zu 5 Rp./kWh berechnet, ein Verhältnis ergibt von $L_2 : L = 0,1\%$, dann ergibt sich:

$$\eta_k = 90 \cdot \frac{8760 - 1080 - 8,76}{8760} = 90 \cdot 0,875$$

somit

$$\eta_k = 78,795\%$$

Der oben angenehme Betriebsunterbruch hat also den so schönen technischen Wirkungsgrad von 90% auf den kommerziellen Wirkungsgrad von etwa 79% herabgedrückt.

Vergleichen wir nun eine Einheit einfacher Konstruktion von geringerem technischem Wirkungsgrad, dafür aber grösserer Betriebssicherheit, zum Beispiel eine Löffelradturbine mit 87% technischem Wirkungsgrade und nur drei Tage jährlichem Betriebsunterbruch. (An den von mir im Herbst 1913 in Betrieb gesetzten Löffelradturbinen der Anlage Big Creek in Californien, 23000 PS Einheiten, 600 m Gefälle, 375 Uml/min, musste während der ganzen Zeit nie ein Lagerdeckel abgehoben werden, und die Einheiten versagten nie, solange sie im Betriebe sein mussten). Nehmen wir ferner für das zu betrachtende Beispiel an, dass die Reparaturkosten im gleichen Verhältnis stehen, wie die Stunden des Betriebsunterbruches. Dann ergibt sich:

$$\eta_k = 87 \cdot \frac{8760 - 144 - 87,6 \cdot \frac{72}{504}}{8760} = 87 \cdot 0,9821$$

somit

$$\eta_k = 85,544\%$$

Das vom Standpunkte des Konstrukteurs im Vergleich mit der Hochdruck-Francisturbine als minderwertig betrachtete Löffelrad steht also am Ende des Betriebsjahres volle $6\frac{3}{4}\%$ über jener.

Dieser Vergleich ist keineswegs nur ein theoretischer, sondern hat sich in der Praxis vollat bestätigt. Als vor etwa acht Jahren die Caribou Anlage der Great Western Power Co. in Californien gebaut wurde, fragte es sich, ob man die 30000 PS Einheiten für 300 m Gefälle als Löffelradturbinen oder als Hochdruck-Francisturbinen bauen sollte. Nach einlässlichen Untersuchungen waren wir entschieden für die Wahl von Löffelrad-Einheiten, obschon nur 171,5 Uml/min erzielt werden konnten, um die hierzulande so beliebte und äusserst betriebsichere überhängende Einstrahl-Doppelturbine anwenden zu können. Seither hat es sich erwiesen, dass die mit wenigstens 87% Wirkungsgrad in sozusagen ununterbrochenem Betriebe stehenden Einheiten eine weit bessere Betriebs-Bilanz zeigen, als Hochdruck-Francisturbinen, deren Ergebnisse seither auch praktisch untersucht werden konnten.

Um ein finanzwirtschaftliches Bild zu erhalten, wollen wir nun eine Hochdruck-Francisturbine von 50000 PS mit einer Löffelradturbine gleicher Kapazität und für den selben Betrieb vergleichen. Auf der Annahme, dass die elektrische Energie zu 2 Rp./kWh abgesetzt werden kann, ergäbe sich eine Jahreseinnahme von ungefähr $35000 \cdot 0,02 \cdot 8760 = 6132000$ Fr. Der Ausfall von $6\frac{3}{4}\%$ im kommerziellen Wirkungsgrade der Francisturbine im Vergleich mit dem Löffelrad, wie im vorigen Beispiele angeführt, ergäbe somit eine Einnahme-Einbusse von $0,0675 \cdot 6132000 = 413910$ Franken, oder zu 15% kapitalisiert die beträchtliche Summe von rund 2,75 Millionen Fr. Nun ist es kaum denkbar, dass die Mehrkosten der Löffelradturbinen-Anlage gegenüber einer Hochdruck-Francisturbinen-Anlage diesen vollen Betrag aufbrauchen würden. Dadurch wäre aber der Beweis geliefert, dass der als minderwertig betrachtete Löffelrad-Ausbau ein besseres Finanzunternehmen ist, als der an technischem Wirkungsgrade viel hochwertigere Ausbau einer Francisturbine, der aber eine Reihe von Betriebsstörungen mit sich bringt.

Es spielen natürlich noch eine Reihe anderer Faktoren mit, doch ändern sie das Bild in seinen Grundzügen nur wenig.

Wir sehen also, dass die Länge eines Betriebsunterbruches die Hauptursache der Verringerung des „kommerziellen Wirkungsgrades“ bildet. Es lohnt sich daher, hier die Ursachen eines Betriebsunterbruches zu betrachten. Sie können in manchen Fällen nicht der Turbine selber zugeschrieben werden, wenn sich Störungen zeigen im elektrischen Teile (Generator, Transformator, Fernleitung usw.),

DAS KRAFTWERK PARTENSTEIN BEI LINZ A. D.

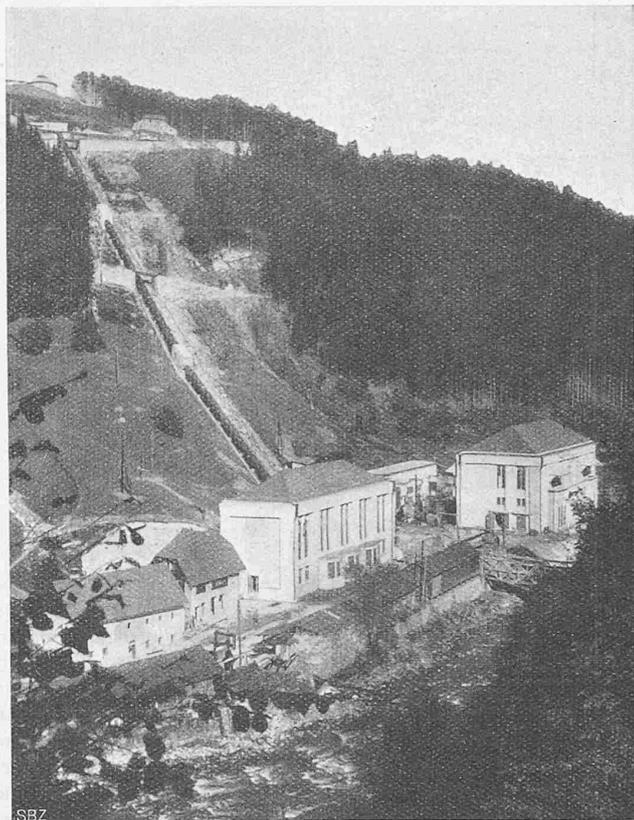


Abb. 5. Wasserschloß, Druckleitung und Zentrale.

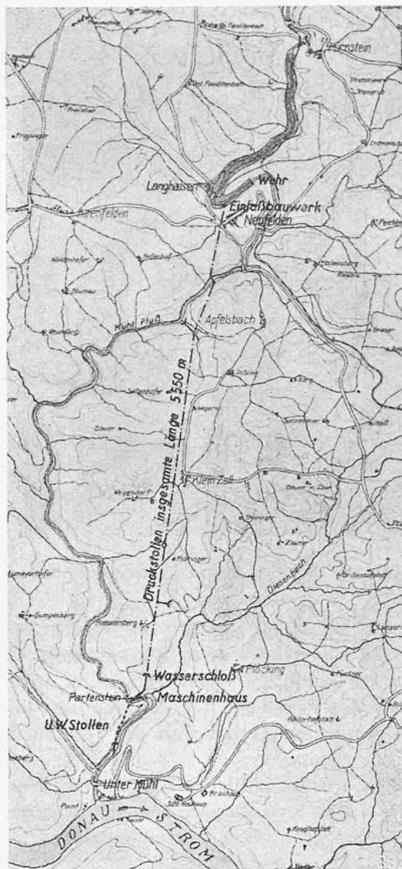


Abb. 1. Lageplan. — Masstab 1 : 80 000.

oder in der Wasser-Zu- oder Ab-Leitung. Wir wollen hier jedoch nur die Störungen im Betriebe der Turbine selber betrachten. Das Abstellen wird notwendig:

1. bei mechanischen Defekten, wie Bruch von Maschinenteilen, Festsitzen von Lagern und Gelenken, usw.
2. bei hydraulischen Defekten, wie Ausfressen von Lauf- und Leiträdern, usw.

Die Zeitdauer des Unterbruches hängt zunächst einmal vom Umfang dieser Schäden, aber auch sehr stark von der Zugänglichkeit der reparaturbedürftigen Teile ab. Je zugänglicher solche Teile sind, und je mehr eine zu erwartende Abnutzung auf rasch auswechselbare Ersatzteile beschränkt werden kann, desto geringer gestalten sich natürlich alle in der Formel des kommerziellen Wirkungsgrades enthaltenen Werte L_1 , L_2 und L_3 .

Es könnte noch ein weiterer Wert L_4 eingeführt werden, nämlich der Verlust an Arbeit zufolge allmählicher Einbusse des technischen Wirkungsgrades, hervorgerufen entweder durch Ausfressen, d. h. hydraulische Abnutzung, oder durch mechanische Abnutzung zufolge hoher Materialbeanspruchung oder unzuverlässiger Schmierung, usw.

Konstruktionen mit ineinander geschachtelten Teilen, oder mit gedrängten, zwar Material sparenden Abmessungen, mögen wohl zu einem niedrigen Erstellungspreise der Einheit beitragen und daher einem im Dauerbetriebe unerfahrenen, oder nur auf den Anschaffungspreis schauenden Käufer in die Augen leuchten. Sie setzen aber unbedingt den kommerziellen Wirkungsgrad herab, sodass der Käufer am Ende der Betriebsjahre einfach einen geringeren Gewinn aus seiner Kapital-Auslage zieht.

Hohe Umlaufzahlen mögen wohl den Anschaffungspreis des Generators heruntersetzen. Wenn sie aber dadurch gedrängte Turbinenabmessungen bedingen, die ein Ausfressen von Lauf- und Leiträdern nach sich ziehen, oder eine komplizierte Konstruktion, die die Einheit unzugänglich und daher eine Reparatur zeitraubend macht, so ist die scheinbare Geldersparnis bald aufgezehrt, und dann

ergibt sich eben wieder eine Bilanz, die durch die Brille des Bankiers ungünstig aussieht.

Ein grosses Feld neuer und ertragreicher Bestrebungen öffnet sich dem Turbinen-Konstrukteur, wenn er sein Augenmerk auf den kommerziellen Wirkungsgrad lenkt, und nicht nur auf den technischen. Er wird sich ein Verdienst erwerben, wenn er einen Käufer überzeugen kann, dass es weiser ist, 125 Fr. auszugeben, die am Ende des Jahres noch 124 Fr. wert sind, als nur 100 Fr. auszugeben, die am Ende des Jahres einen Wert von nur noch 85 Fr. besitzen.

Wenn wir unserem Klienten solche Gesichtspunkte vortragen, so erweisen wir ihm und unserem Ansteller einen weitgrösseren Dienst,

als wenn wir Konkurrenzschinderei betreiben, und noch ein paar Prozente technischen Wirkungsgrades aus einer Turbine herauszupressen versuchen.

Die baulichen Anlagen des Kraftwerkes Partenstein.

Von Ing. HANS SCHACHERMEYR, behördl. autor. Ziv.-Ing.,
bautechn. Direktor der O. W. E. A. G., Linz.

Im Oktober 1924 hat die Oberösterreichische Wasserkraft- und Elektrizitäts A.-G. ein Kraftwerk dem Betrieb übergeben, das infolge des Umstandes, dass es während den wirtschaftlich schwierigsten Nachkriegszeiten gebaut wurde, weit über die Grenzen von Oesterreich hinaus bekannt wurde. Der grosse Anteil, den Schweizer Ingenieure als Berater und teilweise auch als bauführende Techniker an dem Werke haben, sowie die Beteiligung von Schweizer Kapital rechtfertigt es, auch an dieser Stelle die wichtigsten Daten der Anlage kurz zusammenzufassen.

1. *Hydraulische Verhältnisse.* Das Kraftwerk nützt das Gefälle der Grosse Mühl zwischen Neufelden und der Donaumündung aus (Abb. 1). Die Grosse Mühl ist einer der zahlreichen Nebenflüsse der Donau, die ihr von unterhalb Passau bis gegen Wien am linken Ufer zuströmen. Diese Zubringer kommen aus dem böhmisch-mährischen Granitplateau, einem Gebiet, das mit einer mittleren Regenhöhe von etwa 1000 mm im Zusammenhalt mit reichlicher Bewaldung hydraulisch besonders günstig genannt werden kann. Die Grosse Mühl führt bei einem Einzugsgebiet von 506 km² jährlich insgesamt 297,1 Mill. m³ Wasser ab, was einem Abfluss-Faktor von 58,8 % der jährlichen Regen- und Schneemenge entspricht. Ihre Abflussverhältnisse weisen auf den Mittelgebirgs-Charakter des Einzugs-Gebietes hin, die Niederwasserperioden liegen in den Monaten August und September. Das Kraftwerk eignet sich also bestens zum Zusammenarbeiten mit den aus Gletscherwässern gespeisten Werken im Süden der Donau, die zu jenen Zeiten geringe Wassermengen zur Verfügung haben, wo die Zubringer nördlich der Donau noch eine unverminderte Menge aufweisen. Als neunmonatliche Wassermenge kann 4,25 m³/sek angenommen werden entsprechend einem Abfluss von 8,4 l/km², als sechsmonatliche Wassermenge 6,0 m³/sek entspre-