

EINSATZ VON BÁNKI-TURBINEN IN NIEDERDRUCK-KLEINSTWASSERKRAFTWERKEN

E. TRENKA

Lehrstuhl für Strömungsmaschinen,
Technische Universität, H-1521 Budapest

Eingegangen am 29 März 1984

Summary

The factories of hydroturbines propose first propeller-type turbines for low-head mini water power stations and for the purpose they developed series of standardized propeller-type turbines of various conceptions. This paper compares the characteristics of the Bánki turbine with those of the propeller-type turbines summing up its favourable peculiarities showing the possibilities of its standardizing and comes to the conclusion, that the Bánki turbine can be favourably used in mini water power stations, and can significantly contribute to the reduction of the costs of investment.

In Ungarn gelten als Kleinstwasserkraftwerke wegen der topographischen und hydrologischen Gegebenheiten jene kleinen Anlagen, deren Leistung 100 kW nicht überschreitet. Im Ausland werden in einigen Ländern die Anlagen mit einer Leistung von einigen Hundert kW, in anderen diejenigen als Kleinstwasserkraftwerke (Kleinwasserkraftanlage, mikrogas, mikrocentrale, small hydropower, mini hydro) bezeichnet, deren Leistung unter 1 bis 2 MW liegt. Als Kleinst-, Mini- oder Mikrowasserturbinen werden die Maschinen betrachtet, deren Leistung 100 bis 500, ew. 1000 kW nicht überschreitet. Diesen entsprechen bei uns die Kleinst- oder tatsächliche Mini-Turbinen mit Leistungen von 50 bis 100 kW.

Nach dem Lehrstoffheft „Törpe vízerőművek tervezése“ („Entwurf von Kleinstwasserkraftwerken“) von E. Kertai und Gy. Laky (herausgegeben 1956 durch das Fortbildungsinstitut für Ingenieure) — das als Kleinstwasserkraftwerke die Anlagen mit einer Leistung unter 60 kW bezeichnet — besteht in Ungarn die Möglichkeit für den Ausbau von etwa 600 Kleinstwasserkraftwerken mit einer Gesamtleistung von etwa 23 000 kW Leistung und 150 Millionen kWh Energieerzeugung im Jahr. Die nutzbaren Fallhöhen liegen überwiegend unter 10 m. Die durch das Institut für Wasserwirtschaft 1978 erarbeitete Studie „Der technisch nutzbare Wasserkraftvorrat Ungarns“ weist 54 kleine

Wasserläufe nach, deren Leistung bzw. die Leistung ihrer einzelnen Abschnitte 10 kW/km überschreitet. Ihr 50 prozentiger theoretischer Wasserkraftvorrat und theoretische Energieerzeugung im Jahr betragen 35 000 kW bzw. 250 Mill. kWh.

Turbinen der Niederdruck-Kleinstwasserkraftwerke

Im allgemeinen werden Fallhöhen unter 15 bis 25 m als Niederdruckbereich bezeichnet. Für die Nutzung dieses Fallhöhenbereiches stellt die achsialdurchströmte Turbine den klassischen Turbinentyp dar, der 1913 von Viktor Kaplan, — der zu der Zeit als Ingenieur im Leobersdorfer Werk der Budapest Fabrik Ganz arbeitete und seine ersten Versuche dort und anschließend in Brünn durchführte — veröffentlicht und nach ihm benannt wurde. Diese Turbine übertrifft erheblich sowohl im Einheitswasserstrom als auch in der Einheitsdrehzahl die anderen Turbinenarten und folglich ist auch ihre spezifische Drehzahl bedeutend höher, kann sogar mehr als das Zweifache der Francis-Turbine beitragen. Die koordinierte Regelung des Leitapparates und der Laufradschaufeln, — also die doppeltgeregelte achsialdurchströmte Turbine, die als Kaplan-Turbine bezeichnet wird — ermöglicht hohe Wirkungsgrade in weiten Fallhöhen- und Wassermengenbereichen und übertrifft die anderen Typen auch in dieser Beziehung. Die Einführung der Rohrturbine bedeutete eine Weiterentwicklung der Nutzung kleiner Fallhöhen. Das führte zur weiteren Verringerung der Abmessungen, des Raumbedarfs und der Masse der Turbine und des Generators, zur Vereinfachung des Kraftwerkbaues, zur bedeutenden Verminderung seines Volumens und zur Senkung der Baukosten. Die wirtschaftlichste Lösung der Nutzung des Niederdruckbereiches wird zur Zeit demzufolge durch die Rohrturbinen und ihre verschiedenen Konstruktionsvarianten gewährt.

Infolge der Ölpreisexplosion vor etwa 10 Jahren wurde die Befriedigung des Energiebedarfs im Weltmaßstab kritisch und neben äußerster Sparsamkeit mit den rasch abnehmenden Energieträgern, insbesondere dem Erdöl, rückte eine zunehmende Nutzung der sich erneuernden Energiequellen in den Vordergrund. Die Nutzung der früher außer acht gelassenen kleinen Wasserläufe, der Bau von Kleinstwasserkraftwerken kam dabei an die Tagesordnung nicht nur in den Entwicklungsländern sondern auch in den hochentwickelten Industrieländern mit entsprechend ausgebautem elektrischem Übertragungsnetz, wie die Vereinigten Staaten, Frankreich, Schweden, Österreich usw. Um die Wirtschaftlichkeit der Kleinstwasserkraftwerke zu sichern, haben zahlreiche international anerkannte Wasserturbinenhersteller

und verschiedene kleinere Firmen binnen kurzer Zeit für Serienfertigung geeignete, standardisierte Turbinenreihen entwickelt. Für Fallhöhenbereiche bis 25 m werden wegen der im vorhergehenden erwähnten günstigen Kennwerte vor allem achsialdurchströmte Turbinentypen von verschiedenen Konstruktionskonzepten empfohlen. Man findet unter ihnen Spiralgehäusebauart, am stärksten sind die „S“ Rohrturbinen mit liegender, stehender oder schräger Welle vertreten, und einige Firmen empfehlen einen mit gekapseltem Stromerzeuger zusammengebauten, auch mit einem Planetengetriebenen ausgerüsteten Rohrturbinentyp. Wegen der kleinen Abmessungen und der niedrigen Leistungen kann bei diesen Maschinen, besonders bei den hier untersuchten Turbinen mit einer Leistung unter 100 kW, die Regelung der Laufradschaufeln nicht in Frage kommen, weil eine entsprechende Regelvrichtung ziemlich kompliziert, empfindlich und vor allem kostspielig ist. Die Kleinstrohrturbinen stellen somit keine Kaplan-turbinen dar sondern sind lediglich Propellerturbinen mit Leitradregelung. Zwecks weiterer Vereinfachung wird oft auch auf die Leitradregelung verzichtet und es werden Propellerturbinen mit festen Leitschaufeln empfohlen, in einigen Fällen mit Leistungen bis zu 100 kW, in anderen Fällen sogar bis zu 500 kW.

Zur Beurteilung der Einsatzmöglichkeiten und der Voraussetzungen für die Standardisierung der Bánki-Turbine wird im nachfolgenden ein Vergleich zwischen ihren technischen Kennwerten sowie sonstigen Eigenschaften und denen der Propellerturbine mit Leitradregelung angestellt. Die vorliegende Untersuchung hat zum Zweck, den für unsere Verhältnisse charakteristischen Fallhöhenbereich zwischen 2 m und 16 m sowie den Leistungsbereich bis zu 100 kW mit einer möglichst einfachen und verlässlichen Konstruktion, möglichst wenigen Maschinentypen und -abmessungen und annehmbaren Parametern zu befriedigen.

Vergleich der Bánki-Turbine mit der Propellerturbine

In Hinsicht der hydraulischen Kennwerte ist für die Bánki-Turbine wegen ihrer „Gleichdruck“-Bauart der Fallhöhenbereich 2 m bis 16 m am ungünstigsten. Das wird durch den Vergleich der spezifischen Drehzahlen

$$n_s = \frac{n \sqrt{P}}{H \sqrt[4]{H}}$$

anschaulich gemacht.

In der für die Wasserturbinen nahezu seit einem Jahrhundert üblichen Formel der spezifischen Drehzahl n_s wird die Leistung P in PS ausgedrückt. Die auf diese Weise errechneten Werte n_s haben sich während dieser langen Zeit dermaßen verbreitet und verwurzelt, daß sie ungeachtet des jahrelang eingeführten SI-Systems meist immer noch verwendet werden. Im nachfolgenden wird auch hier auf diese hingewiesen. Geht man übrigens dazu über, die Leistungen nicht mehr in PS auszudrücken, so wäre es begründet, die in der bisherigen Form verwendete spezifische Drehzahl n_s zu beheben. Es erscheint zweckmäßig, statt der Beibehaltung des obigen Zusammenhanges bei Einsetzung der in kW ausgedrückten Leistungen P , die bei den Pumpen übliche spezifische Drehzahl $n_q = n \cdot Q^{1/2} \cdot H^{-3/4}$ anzuwenden.

Die spezifische Drehzahl der Bánki-Turbine beträgt im allgemeinen $n_s = 35—120$, kann aber den Wert $n_s = 180—200$ erreichen, wenn die Breite B des Laufrads das Dreifache des Durchmessers D ist. Hinsichtlich der spezifischen Drehzahlen stehen somit die Bánki-Turbinen zwischen den Pelton- und Francis-Turbinen, und aus diesem Umstand ergibt sich auch ihr günstigster Einsatzbereich. Mit der Propellerturbine kann hingegen im Fallhöhenbereich 2 m bis 16 m von der Fallhöhe abhängig $n_s = 600$ bis 1000 erreicht werden.

Ein anschaulicheres Bild läßt sich durch den Vergleich der Einheitsdrehzahlen $n_{11} = n \cdot D / \sqrt{H}$ mit den Einheitswasserströmen $Q_{11} = Q / \sqrt{H} \cdot D^2$ gewinnen. Um einen günstigen Wirkungsgrad zu erzielen ist es bei den Bánki-Turbinen wegen ihrer „Gleichdruck“-Bauart erforderlich, daß die Umfangsgeschwindigkeit der Eintrittskanten der Laufradschaufeln, d. h. des Außendurchmessers des Laufrads halb so hoch ist wie die $c_0 = \varphi \sqrt{2gH}$ Freistrahlgeschwindigkeit. Daraus folgt $n_{11} \approx 40/\text{min}$. Die Schluckfähigkeit der Turbine wird durch die Freistrahlgeschwindigkeit sowie durch die Breite des Strahlkanals und die Dicke a_0 seines engsten Querschnitts bestimmt. Die Strahlkanalbreite ist praktisch gleich der Radbreite B und der übliche Wert von a_0 beträgt 0,1 bis 0,2 D . Unter Beachtung des Gesagten kann der auf $H = 1$ m, $D = 1$ m und $B = 1$ m bezogene Einheitswasserstrom der Bánki-Turbinen in der Form

$$Q_{11} = Q / \sqrt{H} \cdot B \cdot D$$

ausgedrückt werden, und mit $a_0 = 0,15$ gerechnet beträgt sein Wert $Q_{11} \approx 0,64$ m³/s. Übrigens ergeben sich aus diesen beiden Werten bei einem Laufrad von der Breite $B = 3D$ die spezifischen Drehzahlen $n_s \approx 180$ bzw. $n_q \approx 55$.

Bei den Propellerturbinen wird n_{11} und Q_{11} durch den in Abhängigkeit von der Fallhöhe angewendeten Laufradtyp bestimmt. Für Vergleichszwecke sind die Mittelwerte $n_{11} \approx 160$ und $Q_{11} \approx 2$ m³/s zu berücksichtigen, denen die spezifischen Drehzahlen $n_s \approx 770$ bzw. $n_q \approx 225$ entsprechen.

Aufgrund eines Vergleichs der vorgeführten Einheitswerte können folgende Feststellungen gemacht werden:

— Bei gleichem Durchmesser D des Laufrads beträgt die Drehzahl der Propellerturbine das Vierfache der der Bánki-Turbine.

— Um die Schluckfähigkeit der Propellerturbine mit einem Laufraddurchmesser D zu erreichen oder sie gut anzunähern ist bei der Bánki-Turbine ein Laufrad von der Breite $B = 3D$ anzuwenden.

Der obige Vergleich beweist die allgemein bekannte Überlegenheit und die Vorzüglichkeit der hydraulischen Parameter der Flügelradturbinen im Niederdruckbereich. Deswegen werden von den Turbinenherstellern auch für Niederdruck-Kleinstkraftwerke sozusagen ausnahmslos Flügelradtypen empfohlen und entwickelt.

Schließlich soll der Wirkungsgradverlauf untersucht werden. Der Höchstwirkungsgrad der zeitgemäßen Propellerturbinen beträgt auch bei kleinen Maschinenabmessungen annähernd 90%, kann diesen Wert sogar erreichen, der Wirkungsgradverlauf in Abhängigkeit von der Schluckfähigkeit Q ist jedoch recht spitzig, die Leerlaufwassermenge beträgt vom Typ abhängig 40 bis 60% der Höchstschluckfähigkeit. Die Propellerturbinen können also lediglich in engen Wassermengenbereichen mit einem entsprechenden Wirkungsgrad — z. B. über 75% — betrieben werden.

Der Wirkungsgrad der Bánki-Turbinen kann infolge der inneren Verluste nicht über 85 bis 86% liegen, und auch dieser Wert wird dadurch noch weiter vermindert, daß das Laufrad über dem höchsten Unterwasserspiegel einzubauen ist, so daß der Höhenunterschied zwischen der Austrittsstelle des Wasserstrahls und dem jeweiligen Unterwasserspiegel verloren geht, was besonders bei kleinen Fallhöhen ein weiterer Nachteil der Gleichdruckturbine ist. Dieser Nachteil läßt sich teils beheben. Ein Teil der Fallhöhe, der wegen des „Freihanges“ verloren ginge, kann nämlich durch Anwendung eines Saugrohrs zurückgewonnen werden. Die Ossberger-Turbinen, die eine Weiterentwicklung der Bánki-Turbine darstellen, werden durch das Herstellerwerk mit Saugrohr geliefert. Bei kleinen Einheiten kann der Einbau des Saugrohrs nur bei ganz kleinen Fallhöhen und größeren Laufraddurchmessern gerechtfertigt werden, weil die Einrichtung dadurch komplizierter wird (Wellendichtung, Einbau eines Belüftungsventils usw.). Es empfiehlt sich auf eine andere Weise dafür zu sorgen, daß der „Freihang“ auch bei veränderlichen Wassermengen einen annehmbaren Wert habe.

Der Wirkungsgrad der Bánki-Turbine ist zwar dem Wirkungsgrad anderer Typen unterlegen — bei kleinen Fallhöhen kann mit 75 bis 80% gerechnet werden — ihr Wirkungsgradverlauf ist hingegen günstig, die Leerlaufwassermenge beträgt bloß etwa 10% der Größtwassermenge. Nur die

Kaplan-turbinen weisen einen derartigen Wirkungsgradverlauf auf, dieser Typ kann jedoch — wie schon erwähnt — bei Maschinen mit Leistungen unter 100 kW rationell nicht in Betracht gezogen werden.

Der Wirkungsgradverlauf der Bánki- und Propellerturbinen ist in Abb. 1 dargestellt. Daraus geht hervor, daß bei Schluckfähigkeiten unter 70% die Bánki-Turbine einen höheren Wirkungsgrad aufweist als die Propellerturbine

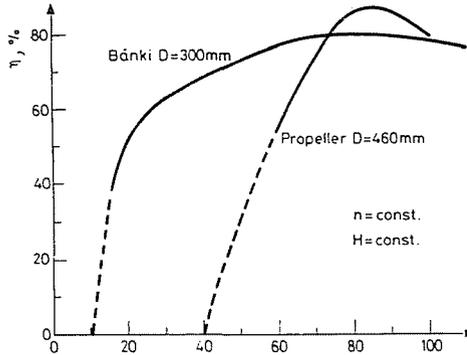


Abb. 1. Wirkungsgradverlauf der Bánki- und Propellerturbine

und daß dieser mit Abnahme der Wassermenge immer mehr zugunsten der Bánki-Turbine verläuft, worin bei der Nutzung stark veränderlicher Abflussmengen ein bedeutender Vorteil liegt. Durch diese vorteilhafte Eigenschaft wird die Standardisierung der Bánki-Turbinen erleichtert sowie die Abdeckung des Wassermengen-Fallhöhenfeldes mit wenigeren Turbinentypen ermöglicht.

In Kenntnis der bisherigen Ausführungen sollen nun die Eigenschaften der Bánki-Turbinen betrachtet werden, durch die ihr Einsatz in Niederdruck-Kleinstwasserkraftwerken gerechtfertigt, konkurrenzfähig und wirtschaftlich werden kann.

Die Frage der Wirtschaftlichkeit stellt sich am schärfsten und entscheidendsten bei den Niederdruck-Kleinstwasserkraftwerken, die Fallhöhen unter 16 m ausnutzen. Deshalb ist vor allem bei diesen von entscheidender Bedeutung einerseits die sparsame bauliche Gestaltung, die eine Ausführung mit möglichst niedrigen Kosten, örtlichen Kenntnissen, Ausrüstungen und Baustoffen ermöglicht, weiterhin die Verwertung bereits vorhandener Wasserbauten, Dämmen, Schleusen, andererseits die Einfachheit, Verlässlichkeit und Anschaffung zu möglichst niedrigen Preisen der hydraulischen und elektri-

schen Einrichtungen. Oft ist nicht der Wirkungsgrad von allergrößter Wichtigkeit, besonders in den Entwicklungsländern, sondern die Möglichkeit, die Einrichtungen auch bei beschränkter Fachkundigkeit inbetriebhalten, warten und reparieren zu können. Wichtig ist es ferner, daß die Einrichtungen möglichst viele handelsübliche Teile enthalten und von besonderem Vorteil ist es, wenn die Turbinenteile, die austauschbedürftigen Bestandteile mit traditionellen Werkzeugen und Methoden an Ort und Stelle zu verfertigen sind. Unter Berücksichtigung dieser Gesichtspunkte lassen sich die vorteilhaften Eigenschaften der Bánki-Turbinen im folgenden zusammenfassen:

— Die Konstruktion ist viel einfacher als die aller anderer Turbinentypen, folglich ist die Maschine verhältnismäßig billig und kann auch in einer kleinen Werkstatt unter beschränkten Voraussetzungen verfertigt werden. Der Einlaufkanal oder die Einlaufrohrleitung, der „Strahlkanal“ und das Turbinengehäuse können aus Blech durch Schweißen, teils sogar aus Beton, bei kleineren Fallhöhen aus Holz verfertigt werden. Gegossene Bestandteile, besondere Werkstoffe sind nicht erforderlich. Auch das Laufrad, der arbeitsaufwendigste Bestandteil der Turbine, läßt sich unter Anwendung des Schweißverfahrens verhältnismäßig einfach herstellen. Die Schaufeln sind im Gegensatz zu anderen Turbinentypen nicht räumlich, sondern zylindrisch und lassen sich somit, aus Rohr ausgeschnitten, leicht formen. Als Regelvorrichtung dient nur eine mit einem einfachen Hebel zu betätigende Schaufel oder Klappe oder ein Schieber. Als Lager können standardisierte, handelsübliche Rollen- oder Gleitlager angewendet werden, sie können aber auch mit Holz-, Gummi- oder Kunststoffbuchsen ausgeführt werden mit Wasserschmierung bzw. in selbstschmierender Ausführung, Axial- bzw. Spurlager sind nicht erforderlich. Das gleiche gilt auch für besondere Abdichtungen und Dichtungsvorrichtungen usw.

— Der Platzbedarf der Turbine ist mäßig, die Montage erfordert nur beschränkte Fachkenntnisse. Die Turbine kann ohne Schwierigkeiten zu einer vorhandenen Schütze, in einem Freilaufkanal oder an Stelle eines Wasserrades eingebaut werden. Zur Wasserzufuhr dient ein offener oder geschlossener Kanal bzw. eine Rohrleitung. Der bauliche Teil beschränkt sich im wesentlichen auf ein einfaches Betonfundament, auch an den Unterwasserkanal werden minimale Anforderungen gestellt. Bei entsprechenden klimatischen Verhältnissen erfordert die Turbine selbst kein Gebäude, keine Abdeckung, und sind diese doch nötig, so können sie von einfachster Ausführung sein.

Die Turbine kann ohne jede Schwierigkeit in einem Kontainer von kleinen Abmessungen eingebaut transportiert werden, der dann sowohl für sie als auch für die elektrische Einrichtung als Krafthaus dient und an der Baustelle lediglich auf Betonstündern zu stellen und an die Wasserzufuhr anzuschließen ist. Dieses Kontainer-Krafthaus kann auch auf einem verankerten Schwimmer oder Floß untergebracht werden, allerdings mit einem flexiblen Anschluß an die Wasserzufuhr, wobei es sich um eine Lösung handelt, die es ermöglicht, den „Freihang“ und den Fallhöhenverlust auf einem Mindestwert zu halten.

— Die Inbetriebhaltung und Wartung der Turbine ist einfach, kann schnell erlernt werden. Die Lager lassen sich leicht überprüfen, instandhalten und austauschen, da sie außerhalb der Maschine angeordnet sind, während bei den Propellerturbinen wenigstens ein Lager innerhalb der Maschine, im Wasserraum angeordnet und erst nach Zerlegen der Turbine zugänglich ist. Die ew. schadhaft gewordenen Bestandteile der Bánki-Turbinen lassen sich mit einfachen Werkzeugen reparieren und meistens an Ort und Stelle verfertigen.

— Die Regelung des Wasserstroms erfolgt durch Verdrehung nur einer Schaufel oder Klappe, während bei den Propellerturbinen dafür ein wenigstens aus acht Schaufeln bestehendes Leitrad und ein ziemlich verwickelter Betätigungsmechanismus erforderlich ist. Man ist bestrebt, die sich daraus ergebenden Mehrkosten durch Anwendung fixer Leitschaukeln zu vermeiden, was zugleich Verzicht auf die Regelung des Wasserstromes bedeutet. Die einzige Regelschaukel oder Regelklappe sichert durch eine einfache Gewichtsbelastung verläßlichen Schutz gegen Durchgang und bei entsprechender konstruktiver Gestaltung ermöglicht auch eine völlige Abspernung des Wasserstromes. Dadurch erübrigt sich der Einbau einer besonderen Absperre vor der Turbine.

— Die wirtschaftliche und verläßliche Lösung der Regelung von Kleinstturbinen und der Automatisierung von Kleinstkraftanlagen ist unabhängig vom Turbinentyp eine Aufgabe für sich. Da die automatisierte Regelung des Wasserstromes den Einsatz einer kostspieligen Einrichtung erfordert, wird davon bei niedrigen Leistungen immer mehr abgesehen. Infolge ihrer Einfachheit und Verläßlichkeit werden Asynchrongeneratoren immer häufiger verwendet, nicht nur bei an das Netz angeschlossenen, sondern auch bei selbständig arbeitenden Kleinstwasserkraftwerken. Ähnlicherweise verbreitet sich die Regelung an der elektrischen Seite. Bei Maschinensätzen, die für ein selbständiges Netz arbeiten, erfolgt die Stabilisierung der Spannung und Periode durch Anpassung der Generatorleistung an die durch die Fallhöhe

und Wassermenge bestimmte Turbinenleistung, usw. in der Weise, daß ein elektronischer Regler eine sekundäre Belastung heranzieht und die vom Verbraucher nicht beanspruchte Leistung darauf leitet. Nicht einmal im Fall der Regelung an der elektrischen Seite ist es bei den Bänki-Turbinen gerechtfertigt, auf die Betätigungsmöglichkeit der einzigen Leitschaufel zu verzichten und eine feste Leitschaufel anzuwenden, weil diese Maßnahme kaum zu einer Vereinfachung der Konstruktion und Kostenersparnis bei der Herstellung führt, hingegen einerseits die im vorhergehenden erwähnten Vorteile — Schutz gegen Durchgang, völlige Absperrung des Wasserstromes— verloren gingen, andererseits die günstige Möglichkeit, die Schluckfähigkeit der Turbine zeitweise, z. B. täglich von Hand oder durch Fernsteuerung den zu erwartenden Belastungen oder den anfallenden Abflußmengen entsprechend einzustellen, wegfallen würde. Dadurch kann die Nutzung der jeweiligen Abflußmengen dem günstigen Wirkungsgradverlauf der Bänki-Turbine entsprechend bedeutend erhöht werden. Noch bessere Ergebnisse sind in dieser Beziehung durch das bei den bereits erwähnten Ossberger-Turbinen eingeführ-

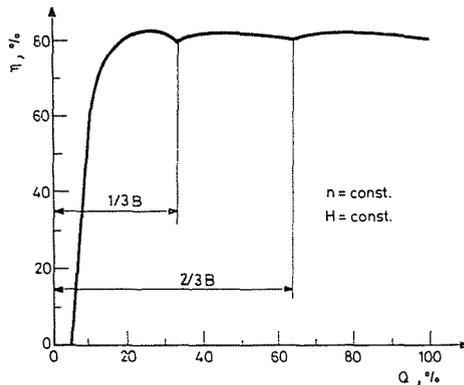


Abb. 2. Wirkungsgradverlauf der Ossberger-Turbine

te Konstruktionskonzept zu erzielen, wodurch der rechteckige Freistrahler im Verhältnis von 1 : 2 in zwei Zellen aufgeteilt wird. Die Turbine kann dadurch kleine Wassermengen mit der kleinen Zelle, mittlere mit der größeren Zelle, große Wassermengen mit beiden Zellen verarbeiten. Die Geschwindigkeitsverhältnisse sind in den drei Fällen gleich, der Wirkungsgradverlauf entspricht somit demjenigen in Abb. 2. Ein derartig günstiger Wirkungsgradverlauf könnte mit der Propellerturbine nur angenähert werden usw. durch Einstellung der festen Laufradschaufeln von Fall zu Fall in dem entsprechenden

Winkel. Diese Maßnahme kann jedoch nicht ergriffen werden, weil sie die Demontage der Maschine erfordert.

Die Standardisierung, die Erweiterung des Einsatzbereiches bzw. die Verringerung der Anzahl der einzelnen Typen und der Größen, die Vereinfachung der Herstellung und die Verringerung der Zahl der Fertigungsvorrichtungen, letzten Endes die Ermäßigung des Preises der Bánki-Turbinen werden neben dem günstigen Wirkungsgradverlauf durch die darin bestehende einzigartige Eigenschaft dieses Turbinentyps begünstigt, daß die Schluckfähigkeit der Maschine bei gegebenem Laufraddurchmesser durch Veränderung der Rad- und Strahlkanalbreite B in außerordentlich weiten Grenzen einzustellen ist. Ein weiterer Vorteil liegt darin, daß — selbstverständlich bei entsprechender Dimensionierung der Bauelemente der Maschine — der gleiche Typ auch bei größeren Fallhöhen eingesetzt werden kann. Für die Standardisierung der Propellerturbinen und die Erweiterung des Anwendungsbereiches der einzelnen Typen liegt eine günstige Möglichkeit darin, daß die Laufradschaufeln im entsprechenden Winkel einzustellen und so zu befestigen sind. Dessenungeachtet sind zur Abdeckung eines Leistungsbereichs bis zu 16 m und 100 kW 3 bis 4 Laufradgrößen und 2 bis 3 Laufradtypen erforderlich. Andererseits können Kleinstpropellerturbinen mit weiteren Laufradtypen höchstens bis zu Fallhöhen von 30 m zur Anwendung kommen, über diese Fallhöhen müssen schon Francis-Turbinen mit durch die jeweilige Fallhöhe bestimmten spezifischen Drehzahlen eingesetzt werden.

Der hervorstechendste Nachteil der Bánki-Turbine gegenüber der Propellerturbine liegt in der erheblich niedrigeren Drehzahl. Um bei den Bánki-Turbinen billige, genormte Generatoren von kleiner Polzahl anwenden zu können, ist infolge des erwähnten Nachteils im allgemeinen ein Getriebe erforderlich, wobei es sich um ein handelsübliches genormtes Zahnradgetriebe, bei Kleinstturbinen unter 100 kW um Riemenantrieb oder sonstigen Bandantrieb handeln kann. Die damit verbundenen Mehrkosten sind nicht beträchtlich und zugleich entfällt die Notwendigkeit der Abstimmung der Turbinen- und Generator Drehzahl aufeinander. Dieser Umstand begünstigt ebenfalls die wirtschaftliche Standardisierung der Bánki-Turbinen, die Verminderung der Anzahl der einzelnen Typen und ermöglicht die einzelnen Maschinen der Turbinenreihe mit einer der Fallhöhe am besten entsprechenden Drehzahl inbetriebzuhalten. Der Bandantrieb gewährt sogar eine gewisse Einbaufreiheit, der Generator kann z. B. über der Turbine angeordnet werden. Im Zusammenhang mit der Drehzahl soll noch erwähnt werden, daß die Durchgangsdrehzahl der Bánki-Turbinen unter dem Zweifachen der Betriebsdrehzahl bleibt, während die der Propellerturbinen etwa das 2,5fache dieses

Wertes beträgt, ein Umstand, der die Konstruktion und den Preis des Generators beeinflusst.

Im nachfolgenden wird die Abdeckung des den einheimischen Verhältnissen entsprechenden Leistungsfeldes zwischen 2 m und 16 m untersucht mit Bánki-Turbinen. Zunächst wird ein Überblick über die schon früher entwickelten und hergestellten Typen bzw. Reihen der Bánki-Turbinen gegeben, über die schriftliche und technische Unterlagen nur sehr spärlich erhalten geblieben sind. Deswegen hat die vorliegende Arbeit unter anderem zum Zweck, die Monographie der einheimischen Vergangenheit von über 60 Jahren der Bánki-Turbinen zusammenzufassen und niederzulegen. Anschließend werden einige ausländische Ergebnisse dargelegt, sodann wird anhand der Analyse dieser Ausführungen eine mögliche Variante der wirtschaftlichen Standardisierung von Bánki-Turbinen erörtert.

Abdeckung des Leistungsfeldes mit durch die Fabrik Ganz hergestellten Bánki-Turbinen

Im Jahre 1917 veröffentlichte zuerst Professor Donát Bánki seinen Vorschlag für eine neue Turbine in der in Budapest erschienenen Publikation „Neue Wasserturbine“ und ließ die Turbine noch in demselben Jahr in Ungarn, dann fortlaufend auch in anderen Ländern patentieren. Die Herstellung der Bánki-Turbine wurde bald, wahrscheinlich ganz am Anfang der zwanziger Jahre, eingeleitet. Nach der Arbeit „Bánki Donát élete és munkássága“ (Leben und Wirksamkeit von Donát Bánki) von Dr. József Varga (Mitteilungen des Lehrstuhls für Strömungsmaschinen der Technischen Universität Budapest, Heft 61, 1959) hat die Absatzorganisation für Bánki-Turbinen AG bis 1928 853 Stück Bánki-Turbinen hergestellt. Nach der Arbeit „Die Bánki-Turbine“ von Dr. István Váradi („Gép“ 1959/3.) wurden die Bánki-Turbinen durch die Gazdaságberendező és Motoreke R. T. (Wirtschaftseinrichtung und Motorpflugherstellung AG) erzeugt u. zw. in Übereinstimmung mit der vorigen Angabe bis 1928 853 Stück für Fallhöhen von 1,5 bis 112 m. Das ist eine sehr bedeutende Menge, da sie ja im Jahresdurchschnitt die Herstellung von etwa 100 St. bedeutet. In der Arbeit von Dr. Váradi ist übrigens auch die Tatsache erwähnt, daß in Deutschland, Frankreich, Österreich, in der Tschechoslowakei und Ungarn bis 1928 3000 St. Bánki-Turbinen erzeugt worden sind.

Über die bis 1928 in Ungarn hergestellten Bánki-Turbinen stehen keine näheren Angaben, Kataloge, technische Zeichnungen und Meßergebnisse zur Verfügung. Die Photokopie von einer undatierten Zeichnung der Wirtschaftseinrichtung und Motorpflugherstellung AG, deren Gegenstand ein „Lauftrad

für die Modellturbine 200 × 60 mm“ ist, stellt die einzige Unterlage dar. Es ist also wahrscheinlich, daß diese Firma der Hersteller der Bánki-Turbinen war, während die sog. Absatzorganisation für Bánki-Turbinen AG nur Vertriebstätigkeit ausübte.

Einige beachtens- und aner kennenswerte Daten des Versuchslaufrades in der erwähnten Photokopie verdienen hier festgehalten zu werden.

Das Laufrad mit dem Durchmesser von 200 mm ist an einer Seite offen, hier kam eine in der Mitte mit einer 15 mm Bohrung versehene 8 mm dicke Glasplatte mit einem Durchmesser von 200 mm zur Anwendung. Die Zahl der aus der Radscheibe konsolartig ausstehenden 60 mm langen Schaufeln beträgt 40. Die größte Dicke des sich an beiden Enden verjüngenden Schaufelprofils beträgt 3 mm, die Teilung am Außenumfang 15,7 mm, am Innenumfang 10,4 mm. Als Werkstoff für die Schaufeln ist in der Zeichnung „Metall“ vorgeschrieben und „die Seitenscheibe und die Schaufel sind aus demselben Werkstoff zu gießen“ und schließlich $D_1/D_2 = 200/132 = 1,51$ d. h. die Radialabmessung des Schaufelkranzes beträgt $s = 0,17 D_1$.

1929 erkaufte die Budapester Fabrik Ganz für 10 Jahre das Patent der Bánki-Turbine und übernahm die Erzeugung des neuen Turbinentyps. Für Herstellungszwecke wurden standardisierte Reihen mit verschiedenen Laufraddurchmessern und -breiten aufgestellt, wobei für jede Maschine auch eine Zwillingbauart vorgesehen wurde. 1930 veröffentlichte die Fabrik einen Katalog der standardisierten Turbinenreihe, der Leistungsangaben, Umrißzeichnungen, Photos, bei einigen, für geringere Fallhöhen ausgelegten Turbinen auch Angaben über ihre Massen enthielt. Die für Fallhöhen von 1,4 m bis 90 m entwickelten Typenreihen bestanden insgesamt aus 34 Größen und ebensoviel Zwillingausführungen, wobei die Leistung der kleinsten Maschinen 1,2 PS, die der größten in Zwillingbauart 1500 PS betrug. Die Konstruktionszeichnungen wurden sicherlich nicht für alle Maschinen der Typenreihe fertiggestellt, sondern wurden aller Wahrscheinlichkeit nach, bedingt durch die einzelnen Bestellungen, dem Typisierungsschema entsprechend von Fall zu Fall ausgeführt. Heute steht uns aber keine einzige Zeichnung mehr zur Verfügung, Gegenstand und Ergebnisse durchgeführter Versuche und Messungen sind nicht bekannt, lediglich einige Photos sind erhalten geblieben. Ende der dreißiger Jahre hat die Fabrik Ganz die Herstellung der Bánki-Turbinen eingestellt. Wieviele Maschinen bis zu diesem Zeitpunkt gefertigt wurden, ist uns ebenfalls nicht bekannt, wahrscheinlich nicht mehr als 50 St.

Die Zahl der in Ungarn hergestellten Bánki-Turbinen dürfte somit etwa 900 betragen. Von diesen Maschinen ist, wie bereits gesagt, außer einigen Photos keine Unterlage erhalten geblieben, die einzige Ausnahme bildet der

erwähnte Ganz-Prospekt, wobei auch dieser kein Originalexemplar ist. Die im Prospekt enthaltenen technischen Daten und Tabellen sind im 1953 erschienenen zweibändigen Buch „Vízterőhasznosítás“ („Wasserkraftnutzung“) von Emil Mosonyi im Abschnitt über Kleinstkraftwerke zu finden (Band 2. S. 584 bis 602). Diese Daten und technischen Parameter eignen sich zur Beurteilung der im angegebenen Zeitraum erzeugten Maschinen und ermöglichen die Abdeckung des untersuchten Leistungsbereiches zwischen 2 m und 16 m.

Die standardisierte Bánki-Turbinenreihe der Fabrik Ganz bestand aus vier Baureihen, die mit den Buchstaben *A*, *B*, *C* und *D* bezeichnet wurden und Turbinen mit verschiedenen Laufraddurchmessern darstellten, die Durchmesser waren jedoch im Prospekt nicht angegeben. In den Typenbezeichnungen innerhalb der einzelnen Reihen, wie z. B. *B* 10 oder *D* 70, bedeutet die Ziffer die Laufradbreite in cm. Für alle Maschinen der insgesamt aus 34 Gliedern bestehenden Turbinenreihen wurden für 30 verschiedenen Fallhöhen zwischen 1,4 und 90 m die Wassermenge Q , die Leistung P und die Drehzahl n , insgesamt 1734 Daten tabellarisch angegeben. (Das wurde auch für die 34 verschiedenen Zwillingausführungen wiederholt, die hier im weiteren nicht beachtet werden). Durch Auswertung dieser Datenmenge ließen sich für die vier Reihen die Laufraddurchmesser wie folgt, ermitteln: $A = 200$ m, $B = 400$ m, $C = 550$ m und $D = 700$ m. Für jede Reihe können

$$n_1 = \frac{n}{\sqrt{H}} \quad Q_{1/B} = \frac{Q}{\sqrt{H, B}} \quad P_{1/B} = \frac{P}{H\sqrt{H} \cdot B}$$

d. h. die auf 1 m Fallhöhe und 1 m Radbreite bezogenen Einheitswerte errechnet werden, deren Wert innerhalb einer Reihe konstant ist. Die *Tabelle 1* enthält die Glieder der Reihe, die Grenzen ihrer Anwendung und die obigen Einheitswerte (hier und im nachfolgenden sind die Leistungen der Originaltabelle der Fabrik Ganz entsprechend in PS ausgedrückt).

Anhand einer Analyse und bezogen auf einen Laufraddurchmesser von 1 m kann festgestellt werden, daß die standardisierte Turbinenreihe der Fabrik Ganz einen einzigen Typ darstellt und alle ihren Glieder geometrisch diesem ähnliche Maschinen von verschiedenen Durchmessern und Breiten sind. Das wird offensichtlich, wenn die für die Bánki-Turbinen ausgelegte, in der Fachliteratur bisher noch nicht publizierte Form der allgemein verbreiteten Einheitswerte n_{11} , Q_{11} , P_{11} und n_s eingeführt wird. Diese Form wird hier zum Unterschied mit einem Stern bezeichnet. Das sind also Einheitswerte bezogen

Tabelle I

Kennwerte der Bánki-Turbinen der Fabrik Ganz

Reihe	D mm	Typ	B mm	n_1 l/min	Q_1/B lit/s	P_1/B PS	n_s	H_{\max} m	Q_{\max} lit/s	P_{\max} PS
A	200	A 40	400	190	100	1	120	2.6	64.5	1.68
		A 30	300				104	4.5	63.6	2.86
		A 20	200				85	10	63.2	6.32
		A 15	150				74	18	63.6	11.5
		A 10	100				60	40	63.2	25.3
		A 5	50				42.5	90	47.4	42.7
B	400	B 80	800	95	200	2	120	2.6	258	6.7
		B 60	600				104	5	268	13.4
		B 40	400				85	12	277	33.2
		B 33	330				77	18	280	50.4
		B 25	250				67	30	274	82.2
		B 20	200				60	45	268	120.6
		B 15	150				52	80	268	214
		B 10	100				42.5	90	190	171
C	550	C 82	820	69	275	2.75	104	6	552	33.1
		C 70	700				96	8	544	43.5
		C 59	590				88	12	562	67.4
		C 48	480				79	18	560	101
		C 40	400				72	26	561	146
		C 34	340				67	35	553	194
		C 28	280				60	50	545	273
		C 22	220				54	80	541	433
		C 18	180				49	90	470	423
D	700	D 70	700	54	350	3.5	85	12	849	102
		D 62	620				80	18	921	166
		D 53	530				74	22	870	191
		D 50	500				72	26	892	232
		D 45	450				68	30	863	259
		D 39	390				63	45	916	412
		D 34	340				59	60	922	553
		D 30	300				55	70	878	615
		D 25	250				50	90	830	747
		D 21	210				46	90	697	627

Gemeinsame Einheitswerte der vier Reihen

$$n_{11} = \frac{n}{\sqrt{H}} D = 38/\text{min}$$

$$Q_{11}^* = \frac{Q}{\sqrt{H \cdot D \cdot B}} = 500 \text{ lit/s}$$

$$P_{11}^* = \frac{P}{H \cdot \sqrt{H \cdot D \cdot B}} = 5 \text{ PS}$$

$$n_s^* = n_{11} \sqrt{P_{11}^*} = 85$$

auf 1 m Fallhöhe, 1 m Laufraddurchmesser und 1 m Laufradbreite, die für die Bánki-Turbinenreihe der Fabrik Ganz die folgenden Werte ergeben:

$$n_{11} = \frac{n}{\sqrt{H}} D = 38/\text{min} \quad Q_{11}^* = \frac{Q}{\sqrt{H \cdot D \cdot B}} = 0,5 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$P_{11}^* = \frac{P}{H \sqrt{H \cdot D \cdot B}} = 5 \text{ PS} \quad n_s^* = n_{11} \cdot \sqrt{P_{11}^*} = 85$$

(Bei n_{11} erübrigt sich die Bezeichnung mit einem Stern, weil da die Radbreite B keine Rolle spielt.)

Da die Bánki-Turbine von „Gleichdruck“-Bauart ist (sie stellt keine reine Gleichdruckturbine dar, da bei größeren Beaufschlagungen in der Spalt zwischen Leitapparat und Laufrad eine gewisse Überdruckwirkung entsteht) liegt es auf der Hand, für die spezifische Drehzahl n_s einen Zusammenhang wie bei den Pelton-Turbinen üblich zu finden und die Werte mit geometrischen Maßen auszudrücken. Wie bekannt ist bei den Pelton-Turbinen

$$n_s \cong (230 - 245) \frac{d_0}{D_0}$$

wo d_0 den Strahldurchmesser, D_0 den Strahlkreisdurchmesser des Laufrads bedeutet.

Die für die Bánki-Turbine ableitbaren Zusammenhänge mit einem Wirkungsgrad von 80% gerechnet ergeben sich zu

$$n_s \cong 250 \sqrt{\frac{B_0 a_0}{D}} \quad \text{und} \quad n_q \cong 78 \sqrt{\frac{B_0 a_0}{D}}$$

wobei D der Außendurchmesser des Laufrads, B_0 die Wasserstrahlbreite und a_0 die Wasserstrahldicke ist. B_0 ist annähernd gleich der Laufradbreite B und der Wert von a_0 liegt, wie schon erwähnt, zwischen $0,1 D$ und $0,2 D$, die Verwendung eines dickeren Wasserstrahls bringt die Abnahme des Wirkungsgrades mit sich.

In den nachfolgenden Abbildungen werden die Anwendungsbereiche in den Fallhöhengrenzen von 2 m bis 16 m der Turbinenreihen A , B , C und D der Fabrik Ganz dargestellt.

In Abb. 3 sind sechs Glieder der Reihe „ A “ dargestellt. Die durchschnittlichen Leistungen betragen 1,5 bis 5 PS, die Drehzahlen ändern sich von der Fallhöhe abhängig zwischen 300/min und 700/min. In Abb. 4 sind neun Glieder der Baureihe „ B “ zu sehen. Ihre Durchschnittsleistungen betragen 2 bis

20 PS, die Drehzahles 150/min bis 400/min. In Abb. 5 sind ebenfalls neun Glieder der Baureihe „C“ bzw. ihre Durchschnittsleistungen und Drehzahlen wiedergegeben, die 5 bis 40 PS bzw. 100/min bis 250/min betragen. Schließlich bezieht sich Abb. 6 auf zehn Glieder der Baureihe „D“ mit Durchschnittsleistungen von 10 bis 70 PS und Drehzahlen von 80/min bis 200/min.

In diesen Abbildungen bedeuten die vollen Linien die sich mit \sqrt{H} ändernde Schluckfähigkeit der Maschinen bei voller Öffnung, d. h. bei maximalen a_0 . Die mit gestrichelten Linien eingezeichneten und in PS angegebenen Leistungen sind mit einem Wirkungsgrad von 75% errechnet

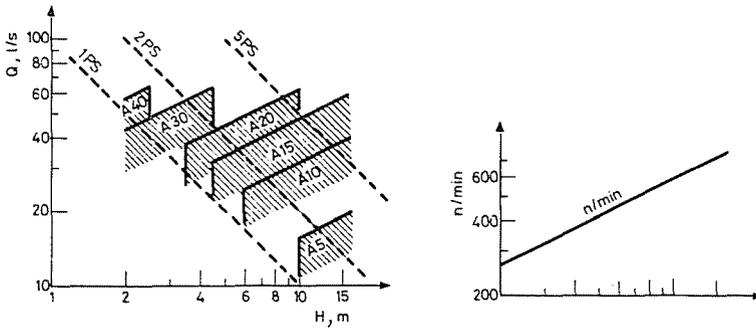


Abb. 3. Bánki-Turbinen der Fabrik Ganz. Reihe „A“, $D=200$ mm

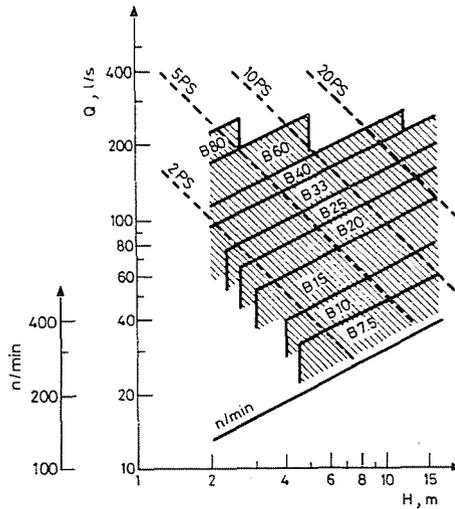


Abb. 4. Bánki-Turbinen der Fabrik Ganz. Reihe „B“, $D=400$ mm

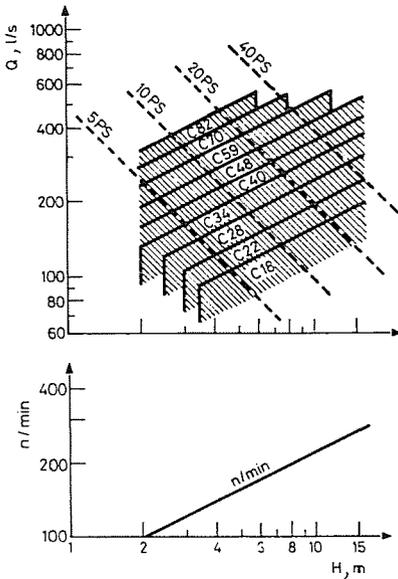


Abb. 5. Bánki-Turbinen der Fabrik Ganz.
Reihe „C“, $D=550$ mm

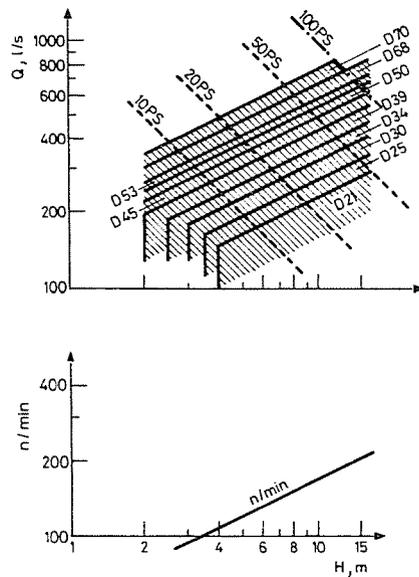


Abb. 6. Bánki-Turbinen der Fabrik Ganz.
Reihe „D“, $D=700$ mm

worden. Die Drehzahlen sind ebenfalls \sqrt{H} proportional und entsprechen der optimalen Umfangsgeschwindigkeit. Mit anderen Worten, es handelt sich dabei um das Q_{\max} bei den günstigsten Umfangsgeschwindigkeiten $u_1 = 0,48 \cdot c_1$ (dieser Wert wurde auch von J. Varga abgeleitet und nachgewiesen in der Arbeit „Tests with the Bánki Water Turbine“) (Acta Technica 1959).

Zur besseren Übersicht wurden in Abb. 7 die Anwendungsbereiche der vier Baureihen A, B, C und D nebeneinander dargestellt. Durch Aufeinander-schieben der einzelnen Felder lassen sich aufgrund dieser und der vorigen Abbildungen folgende Feststellungen machen:

— Im untersuchten Fallhöhenbereich überdecken sich bedeutend die Anwendungsbereiche der einzelnen Baureihen. Der der Reihe „D“ überdeckt beinahe völlig das Feld der Reihe „C“, letzteres wenigstens $2/3$ des Feldes der Reihe „B“ und dieses mehr als die Hälfte des Feldes der Reihe „A“.

— Aus dem Vorhergehenden folgt, daß 34 Glieder der Bánki-Turbinenreihe der Fabrik Ganz in diesem Fallhöhenbereich überflüssig sind. Es ist ungerechtfertigt, bei einem Wertepaar $Q-H$, das durch eine Turbine mit einem kleineren Laufrad zu befriedigen ist, eine Maschine mit einem größeren Laufrad einzusetzen, weil die Drehzahl der letzteren kleiner und die Masse der Maschine bedeutend größer wird.

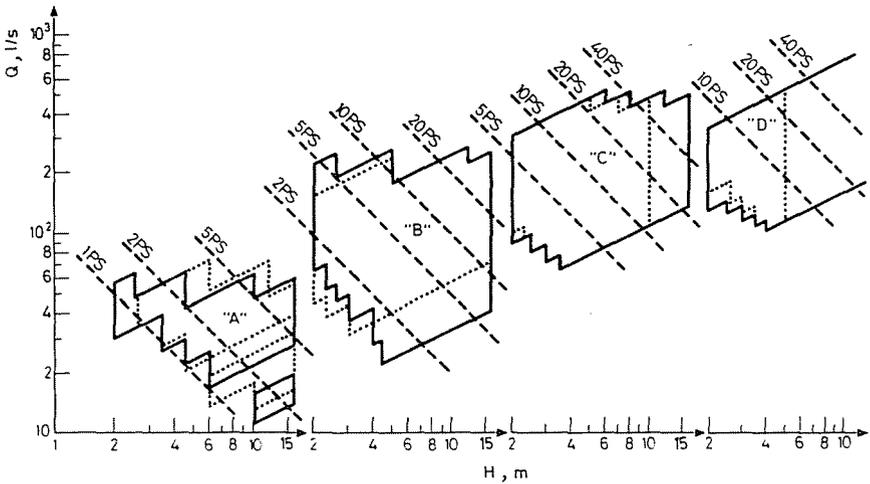


Abb. 7. Bánki-Turbinen der Fabrik Ganz. Einsatzbereiche der Reihen „A“, „B“, „C“, „D“. Volle Linie: In den dreißiger Jahren hergestellte Reihen. Punktirierte Linie: In den fünfziger Jahren hergestellte Reihen

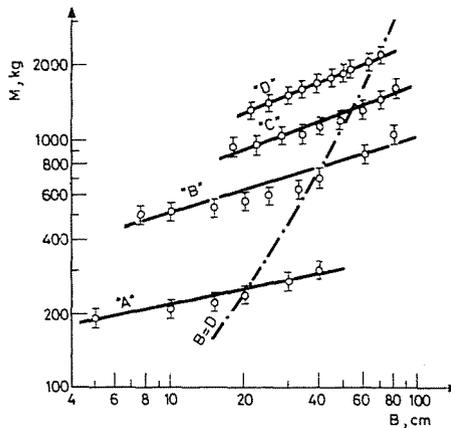


Abb. 8. Masse der Bánki-Turbinen der Fabrik Ganz. $H_{\max} = 15$ m

— Für die Standardisierung ist die Vergrößerungsmöglichkeit der Laufradbreite B , ein bedeutender Vorteil der Bánki-Turbinen, von besonderer Wichtigkeit. In der Abstufung der Radbreiten B der vorgeführten Turbinenreihen der Fabrik Ganz läßt sich keine Regelmäßigkeit feststellen; sie ist zumeist zu dicht, bei der Reihe „A“ lückenhaft. Der Radbreite B werden vor allem durch

Festigkeitsüberlegungen Grenzen gesetzt. Die Bánki-Turbinen der Fabrik Ganz weisen die folgenden größten Laufradbreiten auf:

$$\text{Reihe „A“ } B_{\max} = 2 \cdot D$$

$$\text{Reihe „B“ } B_{\max} = 2 \cdot D$$

$$\text{Reihe „C“ } M_{\max} = 1,5 D$$

$$\text{Reihe „D“ } B_{\max} = D$$

Die Verwendung der einzelnen Laufradbreiten wurde durch die Fabrik Ganz mittels der Fallhöhe eingeschränkt, u. zw. Einheiten mit der Radbreite $B = D$ wurden nur bis zu Fallhöhen von 10 bis 12 m empfohlen.

Der Vollständigkeit halber wurden schließlich die für die Bánki-Turbinen im Prospekt angegebenen Maschinenmassen in Abb. 8 diagrammatisch dargestellt. Die Ganz-Turbinen enthielten seinerzeit zahlreiche gegossene Bestandteile (Einlauf- und Strahlkanal, schwere Lager usw.) Mit Turbinen aus geschweißten Bauteilen können die aus dem Diagramm entnehmbaren Massen bei kleineren Einheiten wenigstens um 30%, bei größeren mindestens um 20% verringert werden.

Die durch die Fabrik Ganz Anfang der fünfziger Jahre umgearbeiteten Bánki-Turbinenreihen

Der Export der durch die Fabrik Ganz hergestellten Wasserturbinen wurde in der Zeit von 1948 bis 1960 durch das Außenhandelsunternehmen KOMPLEX durchgeführt. Anfang der fünfziger Jahre veröffentlichte das Unternehmen KOMPLEX über die Bánki-Turbinen Prospekte und Kataloge in Fremdspachen. Dadurch wurde die Fabrik veranlaßt, die etwa vor 20 Jahren aufgestellten Turbinenreihen umzuarbeiten. Der durch das Unternehmen KOMPLEX herausgegebene Katalog enthält die entsprechenden neuen Leistungsdaten — wie der Prospekt vom Jahre 1930 — in tabellarischer Form. Anhand dieser Angaben läßt sich feststellen, daß in der Zwischenzeit weder eine Weiterentwicklung der Bánki-Turbine stattgefunden hat, noch neue Typen entwickelt worden sind, sondern bei Beibehaltung der früheren Typenbezeichnungen *A*, *B*, *C*, *D*, sowie unter Verwendung der Einheitswerte der früheren Baureihen die Abstufung der Breite *B* der einzelnen Maschinen teils geändert und die Anzahl der Einheiten von 34 auf 28 herabgesetzt worden ist. Die Abstufung blieb jedoch auch in dieser Form zu dicht. Dabei ist die außerordentlich starke Einschränkung des Einsatzbereiches der Reihen „C“ und „D“ recht auffallend. Die Maschinen der Reihe „C“ sind nämlich im

Prospekt höchstens für Fallhöhen bis zu 10 m, die der Reihe „D“ für Fallhöhen bis zu 5 m vorgesehen, während die Anwendung der Maschinen mit einer Breite unter 300 mm dieser beiden Reihen früher für Fallhöhen von 50 bis 90 m empfohlen wurde. Die Anwendungsbereiche der so umgearbeiteten Reihen sind in Abb. 7 mit punktierten Linien eingetragen.

Im neuen Katalog wurden die Turbinenleistungen unter Berücksichtigung eines Wirkungsgrades von 75% angegeben, wobei er gleichzeitig einen Wirkungsgradkurve enthält, wo der Wirkungsgrad bei voller Wassermenge Q 82%, bei Wassermengen zwischen Q und $0,5 Q$ über 80% beträgt und die Leerlaufwassermenge bei $0,07 Q$ liegt.

Aufstellung einer wirtschaftlichen Baureihe unter Anwendung von Einheitswerten der Bánki-Turbinen der Fabrik Ganz

Im vorhergehenden wurde bereits darauf hingewiesen, daß keine der erörterten Bánki-Turbinenreihen als befriedigend und geeignet für die wirtschaftliche Abdeckung des Anwendungsbereiches von Fallhöhen zwischen 2 m und 16 m mit möglichst wenigen Maschinentypen und Maschinengrößen als geeignet betrachtet wird. Dafür soll nun unter Verwendung der bekannten Parameter der Ganz Bánki-Turbinen eine rationelle Variante dargelegt werden.

Es wurden drei Laufraddurchmesser u. zw. $D=200, 400$ und 560 mm bestimmt. Die größte Laufradbreite wurde auf $B=1,4 D$ beschränkt und die Abstufung der Breite B so gewählt, daß sich für jede Maschine ein Einsatzbereich ergibt, der zwischen Q_{\max} und $0,7 Q_{\max}$ Schluckfähigkeit liegt, innerhalb dessen der Wirkungsgrad noch hoch bzw. annähernd konstant ist. Als Typenbezeichnung wurde der Laufraddurchmesser in mm und die Radbreite in cm ausgedrückt verwendet, z. B. $400-40$. Diese Lösung ermöglicht, den Anwendungsbereich zwischen 2 m und 16 m bei 100/min oder darüber liegenden Drehzahlen mit insgesamt 10 Maschinen entsprechend abzudecken. Das ist aus Abb. 9 ersichtlich, wo in Abhängigkeit von der Fallhöhe auch die den einzelnen Laufraddurchmessern entsprechenden günstigsten Drehzahlen angegeben sind.

Dabei handelt es sich selbstverständlich nur um eine der möglichen Varianten, wobei die Möglichkeit, durch Anwendung einer Laufradbreite über $B=1,4$ und durch eine geringe Einbuße am Wirkungsgrad den Einsatzbereich der Maschinen zusätzlich erweitern zu können (z. B. von Q_{\max} bis zu $0,6$ bis $0,65$

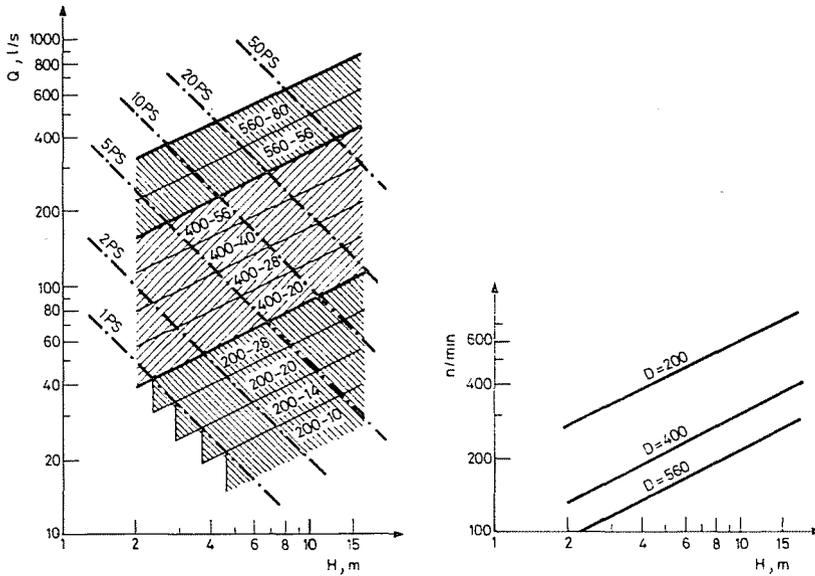


Abb. 9. Einsatzbereich der anhand von Kennwerten der Bánki-Turbinen der Fabrik Ganz aufgestellten Reihen

Q_{\max}) nicht ausgenutzt wird. Dadurch kann die Zahl der zur Abdeckung des Leistungsfeldes erforderlichen Einheiten weiter verringert werden. Weitere Untersuchungen sind jedoch richtig und zweckmäßig nur aufgrund eines Muscheldiagramms durchzuführen, das aber für die Bánki-Turbinen der Fabrik Ganz nicht zur Verfügung steht.

Hier soll erwähnt werden, daß die recht umfangreichen Versuche mit der Bánki-Turbine, die im Laboratorium des Lehrstuhls für Strömungsmaschinen der Technischen Universität Budapest durchgeführt und in der Arbeit von J. Varga „Tests with the Bánki Water Turbine“ (Acta Technica 1959) erläutert wurden, ebenfalls nicht auf die Aufstellung eines Muscheldiagramms abgezielt waren. Es verdient erwähnt zu werden, daß die Messungen an einer Modellturbine mit 30 Laufradschaufeln, mit einem Durchmesser von 200 mm und einem Innendurchmesser des Laufrads von 132 mm vorgenommen wurden. Das Durchmesser Verhältnis D_1/D_2 stimmte also vollkommen mit dem der Versuchsturbine der ehemaligen Wirtschaftseinrichtung und Motorpflugherstellung AG überein, deren Durchmesser ebenfalls von 200 mm war, aber die Zahl der Laufradschaufeln 40 betrug.

Die Ossberger-Turbine, eine weiterentwickelte Variante der Bánki-Turbine

Für die Weiterentwicklung der Bánki-Turbine wurde von Ingenieur Ossberger das erste Patent unter dem Namen Durchströmturbine, cross-flow turbine, im Jahr 1932 angemeldet. Danach folgten weitere Patentanmeldungen, die letzte, unseres Wissens, im Jahr 1955. Die Ossberger-Turbinen werden in Deutschland seit 50 Jahren u. zw. durch die Ossberger-Turbinenfabrik in Weissenburg hergestellt. Über die auch gegenwärtig erzeugten Maschinen enthalten ausführliche Informationen die Anzeigen der erwähnten Fabrik in Fachzeitschriften, der Beitrag „Small but Thriving“ (Klein aber erfolgreich) im Januarheft 1979 der Zeitschrift Water Power und das 1980 herausgegebene Fachbuch „Turbinen, Pumpen und Verdichter“ von F. Dietzel. In den letzteren beiden Publikationen wird erwähnt, daß die Vorläufer der Ossberger-Turbinen die Michell- und die Bánki-Turbinen waren, daß der erstere 1903 veröffentlicht wurde jedoch kein Interesse erweckte und daß der ungarische Professor Bánki seine Turbine von Michell unabhängig erfunden hat.

In Abb. 10 sind das Schnittbild der Ossberger-Turbine und zum Vergleich das der Bánki-Turbine dargestellt. Nun soll auf einige Angaben über Aufbau und Kennwerte der Maschine eingegangen werden:

— Der rechteckige Wasserstrahl wird durch eine der Finkschen Schaufel ähnliche Leitschaufel, die auch zur Regelung des Wasserstroms dient, in zwei Teile geteilt. Dadurch wird die Erhöhung der Wasserstrahldicke a_0 und folglich eine größere Schluckfähigkeit und eine höhere Leistung ermöglicht. Die Finksche Schaufel ist gleichzeitig auch hinsichtlich der Regelungskräfte günstiger als die einseitig belastete Regelklappe die ursprünglich von Bánki verwendet wurde.

— Um einen Teil des durch den „Freihang“ verursachten Fallhöhenverlustes zurückzugewinnen wird ein Saugrohr eingesetzt, eine Maßnahme, die vor allem bei geringeren Fallhöhen und sich innerhalb weiter Grenzen änderndem Unterwasserspiegel vorteilhaft ist. Übrigens ist diese Lösung auch bei den Gleichdruckturbinen von früher her bekannt und wurde in der Fachliteratur der dreißiger Jahre beschrieben.

— Um die Laufradbreite B vergrößern zu können sind eine oder mehrere Schaufelstützscheiben angeordnet, wodurch sogar Radbreiten von $3,5 D$ möglich sind. Dadurch kann eine bedeutende Steigerung der Schluckfähigkeit und der Leistung eines Rades gegebenen Durchmessers erzielt und der Einsatz einer kostspieligen Zwillingmaschine vermieden werden. Dadurch wurde auch das in Verbindung mit Abb. 2 dargelegte konstruktive Konzept, namentlich die Teilung der Strahlkanalbreite in zwei Zellen, ihre gesonderte

oder gleichzeitige Regelung sowie die Verwirklichung des recht günstigen Wirkungsgradverlaufs ermöglicht.

Es ist zu erwähnen, daß die Schaufelabstützung bereits im ersten, im Jahr 1917 herausgegebenen Aufsatz von Professor Bánki erscheint, u. zw. in einer Abbildung, die ein Laufrad von der Breite $B=4 D$ darstellt.

— Die erwähnte Fabrik liefert die Ossberger-Turbinen für die Nutzung von Fallhöhen zwischen 1 und 200 m, für Wassermengen von 20 bis 7000 l/s mit Leistungen von 1 kW bis 1000 kW. Die spezifischen Drehzahlen sind $n_s = 35$ bis 165 bzw. $n_q = 11$ bis 50. Standardisierte Turbinenreihen mit festgesetzten Durchmessern stehen zur Verfügung und die einzelnen Maschinen werden durch die Wahl der Laufradbreite an die Anforderungen angepaßt. Die Schaufeln sind aus Stahlband dem endgültigen Maß und Profil entsprechend

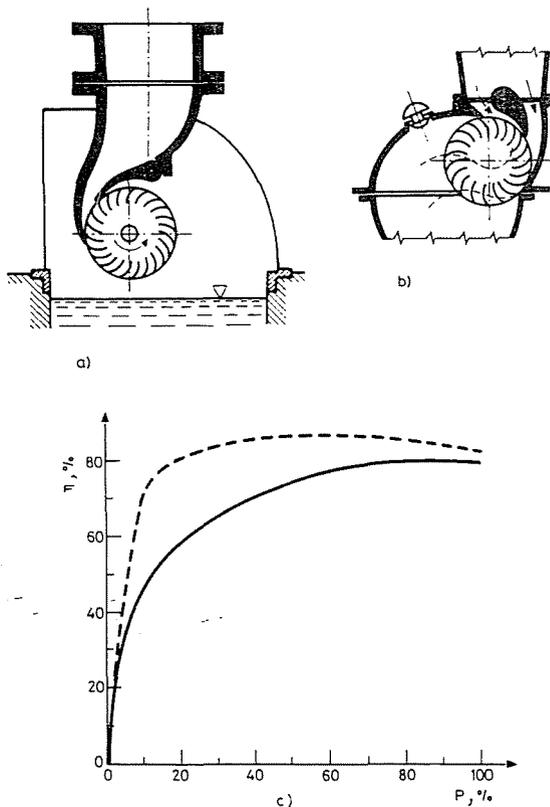


Abb. 10.a. Schnittbild der Bánki-Turbine der Fabrik Ganz

Abb. 10.b. Schnittbild der Ossberger-Turbine

Abb. 10.c. Wirkungsgradkurven der VIGM—Bánki-Turbine und der Ossberger-Turbine

kaltgezogen, ohne weitere Bearbeitung gefertigt. Die Schaufelzahl ändert sich in Abhängigkeit vom Laufraddurchmesser und beträgt höchstens 30. Der Hersteller bezeichnet als großen Vorteil, daß bei diesem Typ kein Axialschub auftritt und keine empfindlichen Spurlager verwendet werden.

— Der Hersteller betont den günstigen Wirkungsgradverlauf, der sich durch die zweckmäßige Gestaltung des Strahlkanals, der Leitschaukel und des Saugrohrs sowie durch die geteilte Regelung erreichen läßt. In den Anzeigen der Fabrik wird ohne Angabe der Größe von Fallhöhe und Leistung die Wirkungsgradkurve wiedergegeben, die in Abb. 10 in Abhängigkeit von der Leistung P dargestellt ist. Die Wirkungsgrade ziemlich weit über 80% sogar bis zu 87% scheinen übertrieben zu sein, auch in der Fachliteratur werden nur Wirkungsgrade etwas über 80% anerkannt.

Der durch das Zentrale Forschungsinstitut der Sowjetunion für Strömungsmaschinen entwickelte Bánki-Turbinentyp

In der Sowjetunion wird den — dort abgekürzt Mikroses genannten — Kleinwasserkraftwerken und der Entwicklung einfacher Turbinentypen, die ihren wirtschaftlichen Ausbau begünstigen, vom Anfang an gebührende Aufmerksamkeit gewidmet. Im Rahmen dieser Anstrengungen wird auch die Ausnutzung der durch die Bánki-Turbine gebotenen Möglichkeiten und Vorteile angestrebt und unseres Wissens, ist ein Betrieb in Taschkent auf die Erzeugung dieser Turbinen abgestellt. Über diesen Maschinentyp sind mehrere Arbeiten erschienen und mit seiner Weiterentwicklung beschäftigte sich wiederholt unter anderen auch das Zentrale Forschungsinstitut der Sowjetunion für Strömungsmaschinen (VIGM). Die erste Publikation des Instituts „Prüfung der Bánki-Turbine auf die Eignung für große Fallhöhen“ ist 1935 erschienen. In der Fachliteratur in unserem Besitz enthält eine Mitteilung des VIGM „Die doppelbeaufschlagte Turbine und ihre Anwendung in Kleinwasserkraftwerken“ aus dem Jahr 1954 das umfassendste Untersuchungsmaterial über die Bánki-Turbine, wobei auch ein vollständiges Muscheldiagramm angegeben wird.

Dieses im Feld $n_1 = n/\sqrt{H}$ und $Q_1 = Q/\sqrt{H}$ dargestellte Muscheldiagramm ist in Abb. 11 wiedergegeben, wo auch der Meridianschnitt der bei einer Fallhöhe von 10 m untersuchten Modellturbine schematisch angegeben ist. Daraus ist ersichtlich, daß der Strahlkanal im Gegensatz zum Bánki- und Ossberger-Turbinentyp nicht vertikal, sondern horizontal ist und daß die Linienführung seiner Wandung sehr einfach und leicht herzustellen ist. Die Regelung des Wasserstroms erfolgt nicht durch eine Klappe (Bánki) oder

Finksche Schaufel (Ossberger), sondern durch eine schieberartig betätigte einfache Platte.

Der Außen- bzw. Innendurchmesser der untersuchten Maschine sind von der Größe 300 mm bzw. 190 mm. d. h. $D_1/D_2 = 1,58$. Die Schaufelzahl beträgt 24. Die Laufradbreite ist $B = 100$ mm, die größte Wasserstrahldicke $a_0 = 47$ mm d. h. $a_0 = 0,157 D_1$.

Wie aus dem Muscheldiagramm ersichtlich, beträgt der höchste Wirkungsgrad 80%; ein Wert, der im Hinblick auf die einfache Konstruktion

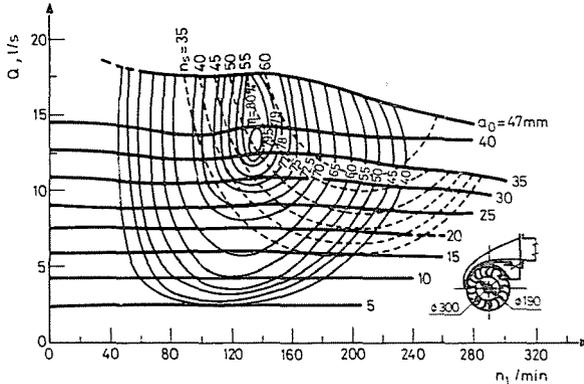


Abb. 11. Muschediagramm der VIGM—Bánki-Turbine (VIGM-Laufrad No. 5)

als günstig zu beurteilen ist. In Zusammenhang damit soll darauf hingewiesen werden, daß durch die an der Technischen Universität Budapest 1959 durchgeführten Messungen ein Höchstwirkungsgrad von 76—77% nachgewiesen wurde ($D_1 = 200$ mm, $D_1/D_2 = 1,51$, $B = 128$ mm, 30 Schaufeln). Professoren Mockmore und Merryfield erreichten im Laufe der in der USA an der Universität des Staates Oregon mit der Bánki-Turbine bei einer Fallhöhe von 4,9 m durchgeführten Laboruntersuchungen einen Höchstwirkungsgrad bloß von 68% ($D_1 = 333$ mm, $D_1/D_2 = 1,51$, $B = 305$ mm, 20 Schaufeln).

Der Wirkungsgradverlauf in Abhängigkeit von der Wassermenge ist günstig, wie das durch die in Abb. 1 aufgrund dieses Muschediagramms eingezeichnete Wirkungsgradkurve anschaulich bewiesen wird. Gleichzeitig sind die Wirkungsgradmuscheln verhältnismäßig breit, ein Umstand, der für die Standardisierung Vorteile bietet. Die Spitze des „Wirkungsgradhügels“ liegt bei $n_1 = 136$ ($n_{1,1} = 40,8$) die Wirkungsgradmuschel von 70% ist durch die Werte $n_1 = 95$ und $n_1 = 180$ begrenzt, d. h. der Wirkungsgrad der Turbine wird in einem Fallhöhenbereich zwischen etwa der Hälfte und dem Zweifachen der zum optimalen Wirkungsgrad gehörigen Fallhöhe bei gleichbleibender

Drehzahl und Schluckfähigkeiten über $0,5 Q_{\max}$ praktisch immer über 70% liegen.

Schließlich ist aus dem Muscheldiagramm zu entnehmen, daß bei einer Strahldicke von $a_0=47$ mm die Schluckfähigkeit mit steigender Drehzahl allmählich abnimmt und der Gleichdruckcharakter erst bei Strahldicken unter $a_0=25$ mm zur Geltung kommt. Die Bánki-Turbine stellt tatsächlich eine „Grenzturbine“ dar, u. zw. in dem Sinne, daß sie nur bei kleineren Öffnungen als Gleichdruckturbine arbeitet.

Zum Vergleich sind in der nachfolgenden Tabelle die Einheitswerte der Bánki-Turbinentypen der Fabrik Ganz und des VIGM zusammengefaßt:

	VIGM	GANZ
$n_{11} = \frac{n}{\sqrt{H}} D$	40,8	38/min
$Q_{11}^* = \frac{Q}{\sqrt{H} \cdot D \cdot B}$	0,59	0,50 m ³ /s
$P_{11}^* = \frac{P}{H \cdot \sqrt{H} \cdot D \cdot B}$	6,2	5 PS
$n_s^* = n_{11} \sqrt{P_{11}^*}$	102	85

Aufstellung einer Kleinstturbinenreihe anhand des VIGM—Bánki-Turbinentyps

Der durch das VIGM entwickelte Bánki-Turbinentyp wurde zur Anwendung für Fallhöhen zwischen 10 und 60 m empfohlen, mit der Bemerkung, daß die Maschine in weiterentwickelter Form für Fallhöhen bis zu 150 m einzusetzen sein werde. Zur Standardisierung wurden durch das Institut Durchmesser von $D=280$ und 430 mm vorgeschlagen, bei den Schaufeln keine Zwischenstützscheiben verwendet, deshalb betrug die größte Laufradbreite nur $B=200$, dagegen wurde auch eine Zwillingsanordnung vorgesehen. Die niedrigste Leistung betrug 5 kW, die höchste bei Fallhöhen bis zu 60 m 100 kW, bei Fallhöhen bis zu 150 m 300 kW.

Die Kenntnis des Muscheldiagramms der VIGM—Bánki-Turbine ermöglicht die Aufstellung einer Kleinstturbinenreihe auf festeren Grundlagen als es anhand der im vorhergehenden erläuterten Angaben möglich war. Diese Aufstellung wird hier zur Abdeckung des Fallhöhenbereiches zwischen 2 m

und 60 m mit Turbinen von Leistungen bis zu 100 kW durchgeführt. Durch die erwähnte Erweiterung der Fallhöhengrenze soll hier die Tatsache wiederholt dargelegt und bewiesen werden, daß sich die Bánki-Turbine vorzüglich für Standardisierung, für Aufstellung einer wirtschaftlichen Reihe, d. h. für die Abdeckung eines beträchtlichen Leistungsbereiches mit wenigen Maschinengrößen eignet, wobei letztere selbstverständlich für die sich aus den Fallhöhen

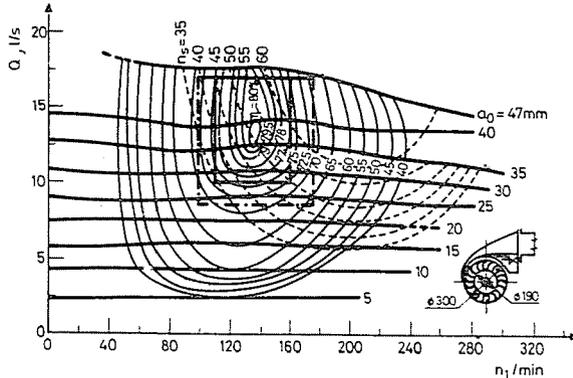


Abb. 12. Die aus dem Muschediagramm der Bánki-Turbine (VIGM-Laufrad No. 5) bei der Aufstellung der Reihen verwendeten Bereiche. Variante „A“ — Variante „B“ - - - -

ergebenden Beanspruchungen ausgelegt werden müssen. Es werden zwei Varianten vorgeführt. Bei der Variante „A“ wurde der „Kern“ des Muschediagramms innerhalb des Wirkungsgrads von 75% berücksichtigt, dessen Grenzen hinsichtlich der Wassermenge die Werte $Q_1 = 17$ l/s und $Q_1 = 10$ l/s hinsichtlich der Drehzahl die Werte $n_1 = 160$ und $n_1 = 110$ bilden, wie das auch aus Abb. 12 ersichtlich ist. Die Größtwassermenge $Q_1 = 17,8$ l/s wird nicht ausgenützt, wodurch eine Leistungsreserve von annähernd 5% erhalten wird. Bei der Variante „B“ wurde mit der dem Wirkungsgrad über 70% entsprechenden Muschediagrammfläche gerechnet, die in Abb. 12 strichpunktiert aufgetragen wurde und die durch die Einheitswerte $Q_1 = 17$ l/s und 8,5 l/s bzw. $n_1 = 175$ /min und $n_1 = 95$ /min abgegrenzt ist. Aus alledem folgt, daß in den standardisierten Einsatzfeldern bei der Variante „A“ die Wirkungsgrade praktisch immer über 75%, bei der Variante „B“ immer über 70% liegen werden, u. zw. mit gleichbleibender Drehzahl.

Die Variante „A“ der standardisierten Reihe und die dieser entsprechenden Einsatzfelder sind in Abb. 13 dargestellt. In der Typenbezeichnung weist der Buchstabe V auf das VIGM hin, die erste Ziffer bedeutet den Laufraddurchmesser in mm, die zweite die Radbreite B in cm. Die größte Radbreite $B = 1.7 D$

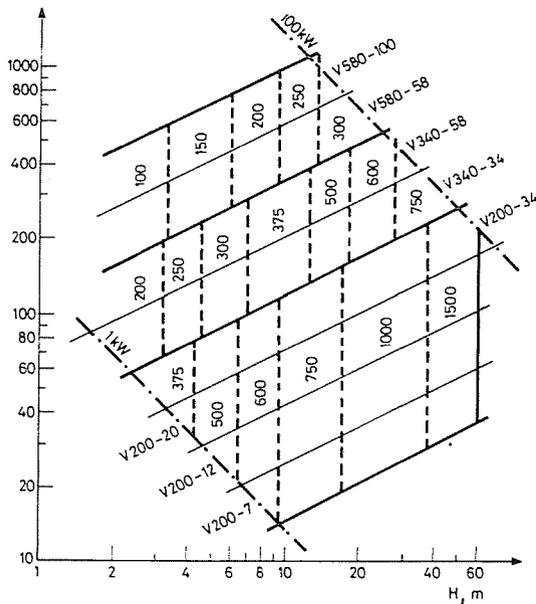


Abb. 13. Einsatzbereich der anhand des VIGM—Bánki-Turbinentyps aufgestellten Reihe.
Variante „A“: $\eta_{\min} = 75\%$

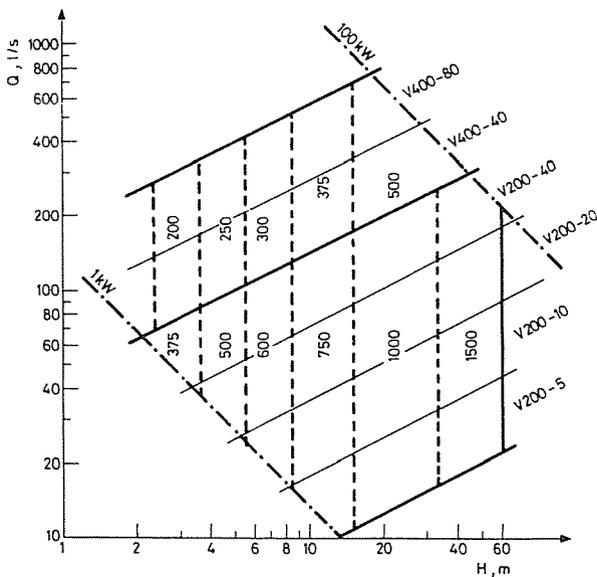


Abb. 14. Einsatzbereich der anhand des VIGM—Bánki-Turbinentyps aufgestellten Reihe.
Variante „B“: $\eta_{\min} = 70\%$

erfordert bei größeren Fallhöhen die Abstützung der Schaufeln. In der Abbildung sind auch die den einzelnen Feldern zugehörigen Synchrondrehzahlen angegeben. Wie aus der Abbildung ersichtlich, ist das durch die Leistung 100 kW abgegrenzte Leistungsfeld zwischen den Fallhöhen 2 m und 16 m insgesamt mit bloß 8 verschiedenen Maschinen, und nur drei unterschiedlichen Durchmessern — 200, 340 und 580 mm — zu befriedigen.

Die Variante „B“ der standardisierten Reihe mit niedrigeren Wirkungsgraden und Laufradbreiten bis $B = 2 \cdot D$ ist in Abb. 14. dargestellt. Hierbei sind nur zwei unterschiedliche Laufraddurchmesser — 200 und 400 mm — und insgesamt 6 verschiedene Einheiten erforderlich.

Die vorgeführten beiden Standardisierungsvarianten geben ein sehr günstiges Bild. Zur Abdeckung eines Leistungsfeldes bis zu einer Fallhöhe von 60 m sind mehrere Francis- und Propellerlaufräder mit unterschiedlichen spezifischen Drehzahlen und Durchmessern erforderlich während dasselbe mit Bánki-Turbinen unter Anwendung von 2 bis 3 Laufraddurchmessern und einigen Maschinenabmessungen zu bewerkstelligen ist. Die Vorteile, die sich dabei für die Herstellung und Herrstellungskosten ergeben, liegen auf der Hand.

Zusammenfassung

Die durchgeführte Untersuchung und der Vergleich mit der Propellerturbine zeigt, daß die Bánki-Turbine in Nieder- und Mitteldruck-Kleinstwasserkraftlagen vorteilhaft anzuwenden ist. Infolge der einfachen Konstruktion erfordert ihre Verfertigung eine beschränkte technologische Ausrüstung und einen geringeren Kostenaufwand, als alle anderen Turbinentypen. Bei der Senkung der Herstellungskosten spielt auch der Umstand eine bedeutende Rolle, daß sie sich ausgezeichnet für Standardisierung eignet, d. h. die Abdeckung eines weiten Wassermengen-Fallhöhenfeldes mit wenigen Maschinengrößen ermöglicht. Die Bánki-Turbinen stellen keine besonderen Ansprüche an die Fundamente, die baulichen Teile der Anlage, Montage, Betrieb und Instandhaltung sind einfach, erfordern kaum Sachverständnis. Ihr Wirkungsgradverlauf ist günstiger als der der Propellerturbine, ihre Drehzahl hingegen bedeutend niedriger, das läßt sich jedoch durch ein entsprechendes Getriebe, einen einfachen und billigen Bandantrieb überbrücken. Dadurch wird eine wirtschaftliche Generatorzahl und folglich der Einbau billiger Standardgeneratoren ermöglicht.

Ernő TRENKA H-1521 Budapest