

# Kaplan-Turbine

Helmut Jaberg

# Viktor Kaplan und seine bahnbrechenden Erfindungen – Zum Andenken an das 100-jährige Jubiläum der Patenteinreichung

Anlässlich des 100-jährigen Jubiläums der Kaplan-Turbine wird ein kurzer Abriss des Werdegangs von Viktor Kaplan gegeben, und auf die Bedeutung dieser Turbinenbauart, der Entdeckung der Kavitation in Wasserturbinen sowie des Kaplan'schen Konstruktionsverfahrens für alle Strömungsmaschinen wird eingegangen. Moderne Berechnungsverfahren für Kavitation werden angerissen.

## 1 Einleitung

Am 7. August 1913 hat Viktor Kaplan sein Patent für die „Schaufelregelung für schnelllaufende Kreiselmaschinen mit Leitvorrichtung“ als Patentschrift Nummer 74 244 (**Bild 1a**) eingereicht. Nota bene hat er als vielseitig interessierter Ingenieur dieses Patent nicht nur auf die später nach ihm benannte Wasserturbine gemünzt, sondern naheliegender weise auf alle Strömungsmaschinen, also auch Dampf- und Gasturbinen sowie Kreiselpumpen und Gebläse. Zum Zeitpunkt der Patenteinreichung (**Bild 1**) war Viktor Kaplan bereits 10 Jahre als Assistent an der Deutschen Technischen Hochschule in Brünn unter der Leitung von Prof. Alfred Musil tätig, dem Vater des Dichters Robert Musil, der übrigens auch zunächst Maschinenbauingenieur wurde, in Stuttgart an der TH arbeitete und sich erst danach der Schriftstellerei widmete. Zuvor war Viktor Kaplan, der 1876 als drittes Kind eines Bahnbeamten in Mürzzuschlag in der Obersteiermark geboren wurde, für zwei Jahre (ab 1901) als Turbinenkonstrukteur bei der Leobersdorfer Maschinenfabrik tätig und fiel bereits dort als innovativer Querdenker auf. Schon als Kind war Viktor Kaplan nach Wien gekommen, wo er nach der Matura auf der Wiener Realschule von 1895 bis 1900 Maschinenbau studierte und anschließend seinen einjährigen Militärdienst bei der Kriegsmarine versah. Ab 1903 verbrachte Ka-

plan (**Bild 1b**) fast drei Jahrzehnte an der Hochschule in Brünn und machte dort auf Basis wissenschaftlicher Forschung seine berühmten Erfindungen. Manche seiner Erkenntnisse, wie z. B. das Kaplan'sche Konstruktionsverfahren für räumlich gekrümmte Schaufeln oder die Entdeckung der Kavitation, haben wohl sogar noch weiterreichende Bedeutung als die berühmte und nach ihm benannte Kaplan-Turbine. 1912, also neun Jahre nach seinem Dienstantritt in Brünn, wurde Viktor Kaplan a. o. Professor für Wasserkraftmaschinen, und ab 1918 war er ordentlicher Professor, ein Zeitraum wie er auch heute bei wissenschaftlichen Hochschulkarrieren üblich ist.

Aufgrund schwerer Erkrankungen ab den 20er Jahren, die wohl nicht zuletzt mit den physischen und psychischen Belastungen seines jahrelangen schlussendlich erfolgreichen Patentstreites mit praktisch der gesamten damaligen Turbinenindustrie verknüpft waren, ließ sich Viktor Kaplan 1931 pensionieren. Er zog sich auf seinen zehn Jahre vorher erworbenen Landsitz Rochuspoint (mit angeschlossener Werkstatt und Gießerei!) am Attersee zurück, wo er bereits 1934 im 58. Lebensjahr verstarb.

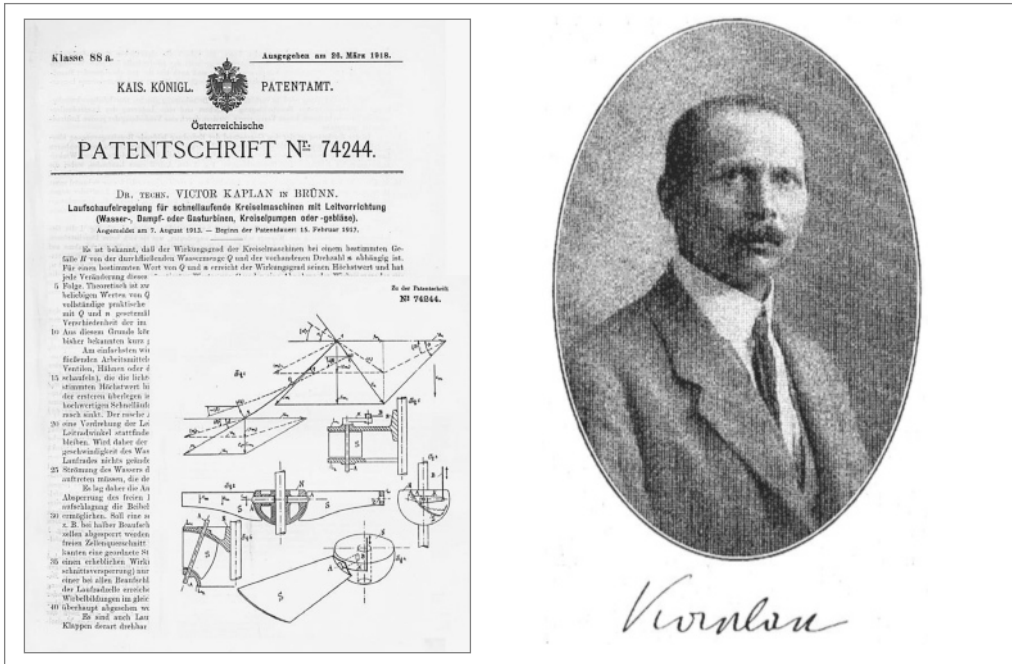


Bild 1: a) Patentschrift Viktor Kaplans von 1913; b) Viktor Kaplan

## 2 Die Bedeutung der Kaplan-Turbine

Die Kaplan-Turbine stellt eine der drei Hauptbauarten der Turbinenbranche dar neben der Pelton- und der Francis-Turbine. Etwa ein Drittel aller gebauten Turbinen weltweit sind Kaplan-Turbinen, sie erzeugen ca. 10 % der weltweiten Wasserkraft. Die hohe, auch wirtschaftliche Bedeutung Viktor Kaplans und seiner Erfindung wurde vielfach gewürdigt, nicht zuletzt zierte sein Konterfei in den 1970er und 1980er Jahren den damaligen Tausend-Schilling-Schein in Österreich.

Mehr noch als „nur“ für große Durchflüsse mit niedrigen Fallhöhen ist die Kaplan-Turbine für stark veränderliche Fallhöhen und Durchflüsse geeignet, also für Charakteristika, wie sie gerade bei Laufkraftwerken an Flüssen mit ihren typischen Abflusskurven auftreten. Ohne Viktor Kaplans Turbine könnten Flusskraftwerke nicht vernünftig ausgerüstet und betrieben werden, andere ältere Versuche, z. B. die doppelflutige Francis-Turbine, blieben im Vergleich nur Stückwerk. Die spezifische Schnelligkeit der Kaplan-Maschine beginnt bei ca.  $n_q = 100 \text{ min}^{-1}$ , bei Fallhöhen

unter ca. 80 m (mit Spiralbeaufschlagung) und setzt sich fort bis hinunter zu Fallhöhen von ca. 20 m und niedriger, dann mit der Rohrturbine als typischer Vertreterin. Aufgrund der Doppelregelung gemäß seinem 1913er Patent mit verstellbaren Leitschaufeln (letztere wurden schon sehr viel früher von James B. Francis erfunden und in dem Kaplan-Patent auch explizit angesprochen) und den verstellbaren Laufschaufeln als seiner eigentlichen großartigen Erfindung kann die Kaplan-Turbine einen außerordentlich großen Fahrbereich von dem maximalen Durchfluss (bei ca. 125 % des Optimaldurchflusses) bis herunter zu ca. 25 % des optimalen mit nur ganz geringen Wirkungsgradeinbußen bei gleichzeitig weitgehender Kavitationssicherheit bearbeiten. Ein ähnlich weites Arbeitsgebiet kann nur die Pelton-Turbine abdecken, die aber bekanntlich als Freistrahlturbine auf einem vollkommen anderen Prinzip basiert.

Oft wird angenommen, Viktor Kaplan habe die Axialturbine erfunden, was jedoch nicht stimmt und von Viktor Kaplan auch nie behauptet wurde. Bereits 1837 ist die Henschel-Jonval-Turbine belegt (Bild 2a), die mit rein axialer, jedoch nicht

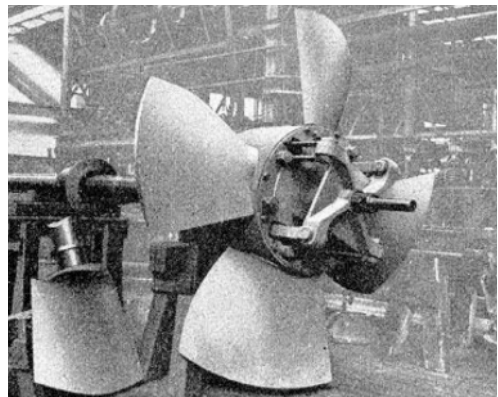
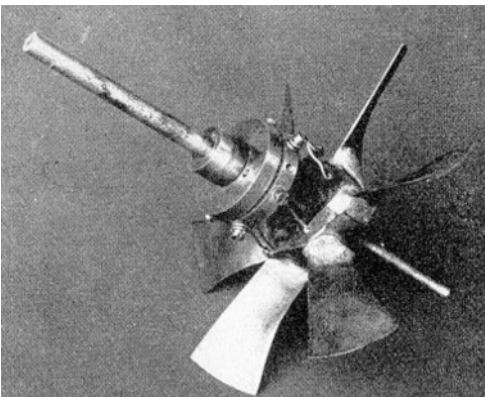


**Bild 2a:** Henschel-Jonval-Turbine, 1837, nicht regelbar

verstellbarer Beschaufelung als direkter Vorläufer der Kaplan-Turbine mit praktisch der gleichen spezifischen Schnellläufigkeit anzusehen ist und als eine frühe Form der Schachtturbine eingesetzt wurde. Die Francis-Turbine wurde 1849 von dem bereits genannten James B. Francis erfunden, interessanterweise betrifft auch diese Erfindung die verstellbaren Leiträder, die radialen Laufräder waren schon damals bereits vorbekannt.

Somit ist der Verdienst Viktor Kaplans die Verstellbarkeit der Laufschaufel und damit die Regelbarkeit von Axialturbinen (**Bilder 2b und 2c**). Bis zum Durchbruch der Turbine war es jedoch noch ein langer Weg, der zunächst von anfänglicher

Ablehnung durch die damalige Fachwelt begleitet war und später in den bereits angesprochenen langjährigen Patentstreit mündete, bei dem Viktor Kaplan als Einzelkämpfer nur seinen Assistenten und unermüdlichen Mitkämpfer Jaroslav Slávik und wenige weitere Freunde zur Unterstützung hatte, aber praktisch alle Turbinenunternehmen der Welt mit ihrer geballten Kraft gegen sich. Es ist aber auch erwähnenswert, dass sich in seinen späteren Jahren Viktor Kaplan namentlich mit der Firma Voith arrangierte, nachdem der Patentstreit gerichtlich zu seinen Gunsten ausgegangen war, und sich eng mit dem damaligen Mitinhaber Walther Voith befreundete.



**Bild 2:** b) Kaplan-Versuchslaufrad (1912/13); c) Kaplan-Laufrad Lilla Edet (1925)

Die erste industrielle Anwendung einer Kaplan-Turbine kam durch Unterstützung von Ignaz Storek (**Bild 3**), den Inhaber einer Eisengießerei in Brünn, zustande und wurde 1919 in Velm, Niederösterreich, in einer Textilfabrik installiert (**Bild 4a**). Sie war bis 1955 in Betrieb (überlebte also ihren Erfinder) und ist heute im Technischen Museum Wien ausgestellt. Auch in der Zusammenarbeit mit der Eisengießerei Storek erwies sich Viktor Kaplan als nicht immer bequemer Querdenker, ganz wie es genialen Köpfen oft nachgesagt wird.

Somit dauerte es nicht weniger als sechs Jahre bis von der Patentanmeldung und einer Laborausführung eine praktische Anwendung mit einem Laufraddurchmesser von gerade einmal 60 cm realisiert werden konnte. Die erste, auch im heutigen Maßstab große Ausführung wurde 1925 im schwedischen Edet unweit einer der auch heute noch größten Papierfabriken Europas von dem Unternehmen Verkstad Kristinehamn realisiert und wies bei einem Laufraddurchmesser von 5,8 m eine Engpassleistung von immerhin 8,1 MW auf (**Bilder 4b und 4c**).

### 3 Die Entdeckung und Erforschung der Kavitation

Zwar ist bis heute die Konzeption der Kaplan-Turbine praktisch unverändert geblieben (**Bild 4**), jedoch hat sich die Weiterentwicklung in einer drastischen Zunahme der Leistungsdichte geäußert und einer deutlichen Verbesserung von Wirkungsgrad (**Bild 5**) und Kavitationsverhalten, das – man muss fast sagen naturgemäß – in Folge der praktischen Einsätze der Kaplan-Turbine ebenfalls von Viktor Kaplan unter kräftiger Hilfe seines Mitarbeiters Slávik im Jahre 1921 entdeckt wurde. Frühere Beobachtungen von Kavitation (z. B. Thoma, TU München) hielt man zunächst fälschlicherweise für ungelöste Luft. Allerdings waren (und sind) die Kavitationsauswirkungen in Francis-Turbinen, in denen Thoma seine Beobachtungen machte, deutlich weniger krass ausgeprägt als bei den Niederdruck-Kaplan-Turbinen.

Bei Schiffsschrauben war zu diesem Zeitpunkt die Kavitation schon bestens bekannt, weil mit der Einführung der Dampfturbinen ab ca. 1890 die Drehzahlen deutlich anstiegen und höhere



**Bild 3:** Eisengießer Ignaz Storek, Förderer Kaplans in Brünn

Schaufelbelastungen mit dem dann fast unvermeidlichen Kavitationsphänomen hervorbrachten. Um dem Phänomen Herr zu werden, nahm Viktor Kaplan Änderungen an der Beschauelungsgeometrie vor, was auch heute noch fast als Patentrezept für die Verbesserung des Kavitationsverhaltens und des Wirkungsgrads gelten kann, obwohl heute natürlich erheblich feinere Werkzeuge namentlich der numerischen Strömungsmechanik zu Verfügung stehen. Wie schon angesprochen liegt somit das Optimierungspotenzial seit der Patenteinreichung der Jahre 1913 in der Verbesserung dieser beiden Charakteristika Wirkungsgrad und Kavitation. Zum Vergleich sei auf die Wirkungsgradverläufe des Kraftwerkes Lilla Edet (1925; **Bild 5**), dem einer modernen Kaplan-Spiralturbine (ca. 1960) und dem einer Kaplan-Spiralturbine aus jüngster Zeit (ca. 2005) verwiesen, wo bei vergleichbaren Ausführungen deutlich die drastische Steigerung des Wirkungsgradniveaus als auch die deutliche Verbesserung des Fahrbereiches erkennbar werden. Damit geht auch die aus **Bild 5** nicht direkt erkennbare Steigerung des Schluckvermögens um über 20 % Hand in Hand.

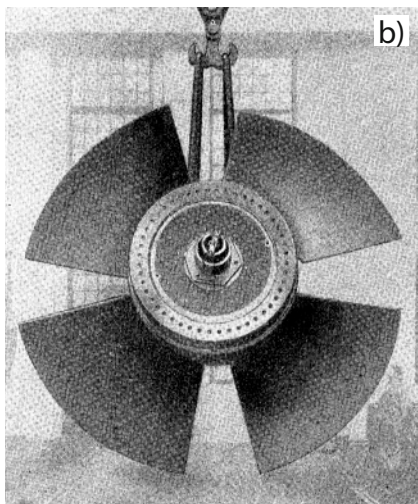
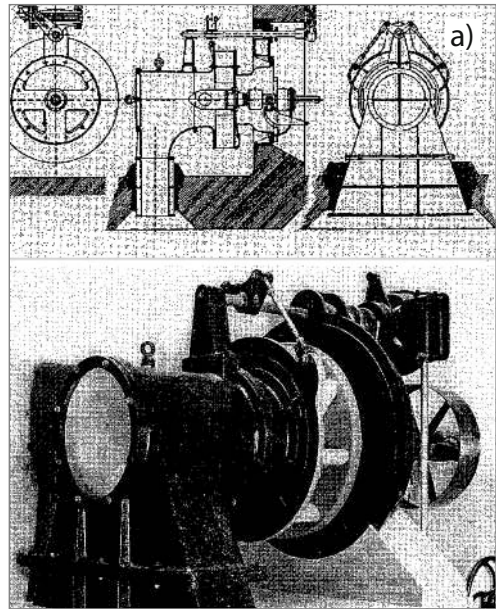


#### 4 Numerische Simulation der Kavitation in Kaplan-Turbinen

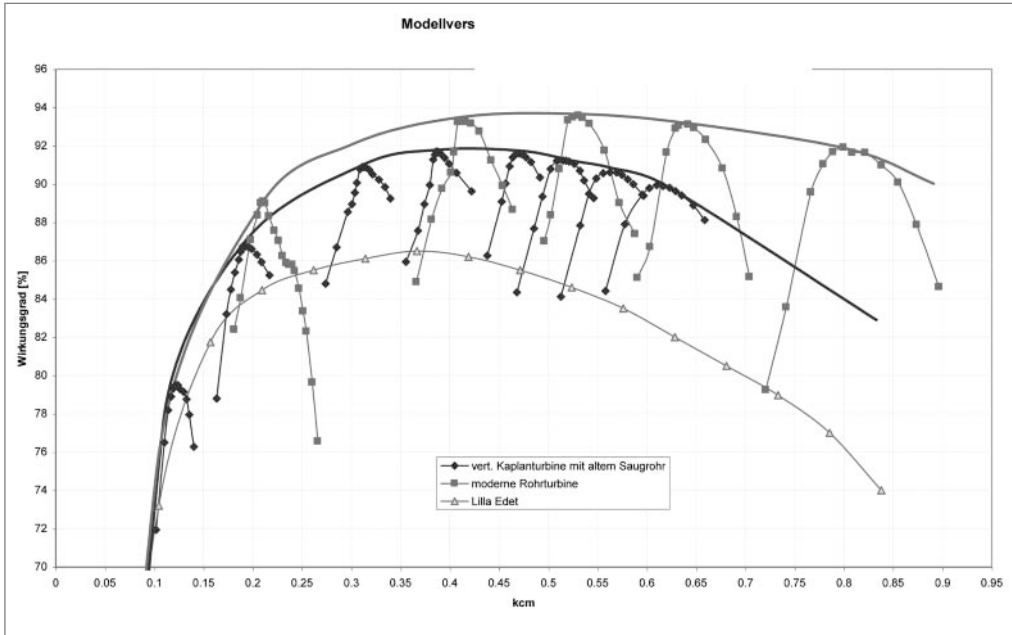
U. a. beim Kavitationsverhalten hilft die numerische Strömungsmechanik deutlich weiter. So gelingt es heute mit der numerischen Simulation zweiphasiger Strömungen, also der gleichzeitigen Betrachtung der flüssigen und der gasförmigen Phase sowie mit Berücksichtigung des Phasenübergangs die Blasenschleppen der ausgeprägten Kavitation mit erstaunlicher Genauigkeit und Zuverlässigkeit zu erfassen, wie es noch vor Kurzem nicht denkbar war – und auch heute nur von wenigen Bearbeitern genau genug erfasst wird.

Es ist aber auch ohne Betrachtung der Zweiphasigkeit, d. h. nur mit einphasiger Berechnung möglich, den Fahrbereich zuverlässig zu erfassen. Hierzu bietet das Histogrammverfahren [1], [2] ein ausgezeichnetes Werkzeug. Bei diesem Verfahren berechnet man denjenigen Grenzdruck, bei dem ein bestimmter Prozentsatz der Schaufelfläche einen niedrigeren Druck als diesen Grenzdruck aufweist. Dieses Verfahren ist auf alle hydraulischen Strömungsmaschinen anwendbar, jedoch muss man den betreffenden Flächenprozentsatz kennen, um den korrekten Grenzdruck zu treffen, mit dem dann seinerseits die charakteristischen NPSH-Werte bzw. die Thoma-Zahl Sigma erfasst werden.

Der betreffende Flächenanteil, für den der Grenzdruck ermittelt werden muss, liegt je nach spezifischer Schnellläufigkeit des Laufrades zwischen einem und fünf Prozent der gesamten Schaufelfläche. Die Herausforderung – und der Know-how-Vorsprung – besteht dann darin, den korrekten Flächenanteil für jede spezifische Schnellläufigkeit



**Bild 4:** a) Die erste industrielle Kaplan-Turbine aus Velm, Niederösterreich, 1919; Die erste Kaplan-Großturbine und der Vergleich zu heute: b) Laufrad Lilla Edet (1925),  $P = 8,1 \text{ MW}$ ,  $D = 5,8 \text{ m}$ ; c) Oberaudorf-Ebbs (1992),  $P = 34,5 \text{ MW}$ ,  $D = 6,1 \text{ m}$



**Bild 5:** Wirkungsgrad und Fahrbereich, damals und heute

und jeden Maschinentyp, also die verschiedenen Pumpen oder Turbinen, zu kennen, ein Wissen, das ausschließlich durch den Vergleich der numerischen Simulation mit der experimentellen Beobachtung des Kavitationsverhaltens gefunden werden kann (**Bild 6a**, [3]). Die berechneten Blasen-schleppen stimmen mit erstaunlicher Genauigkeit mit den Versuchsbeobachtungen überein.

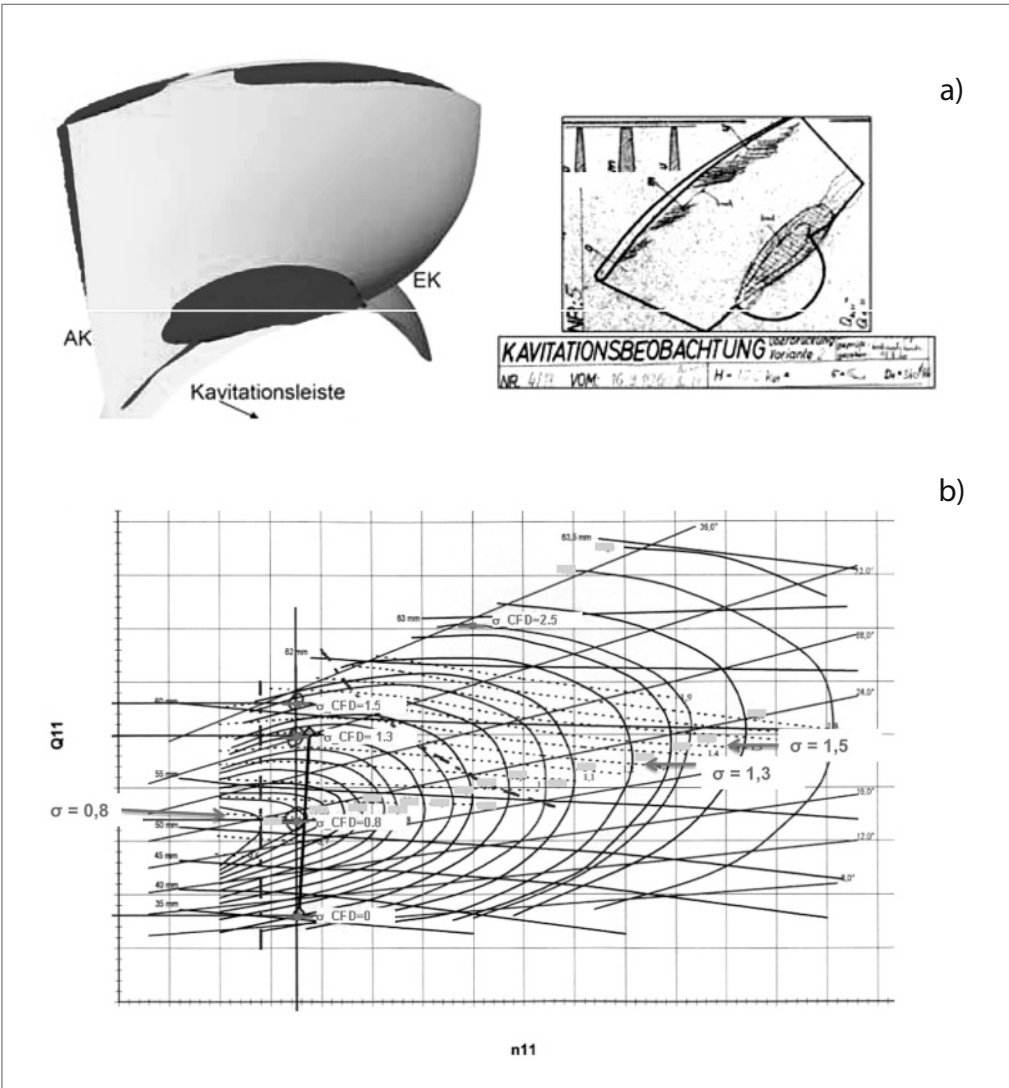
Ebenso stellt **Bild 6b** das gemessene Kennfeld einer Kaplan-Rohrturbine dar, wobei die geraden Linien die Leit- bzw. Laufschaufelstellungen angeben und die Muschelkurven wie üblich den Wirkungsgrad (hier ohne Angabe seiner Größe). Die gestrichelten Linien bezeichnen die gemessenen Sigma-Werte und die mit CFD markierten Punkte die durch numerische Simulation mit dem Histogrammverfahren gewonnenen Sigma-Zahlen, die auch hier mit bemerkenswerter Genauigkeit diejenigen wirklichen Werte treffen, bei denen Blasengebiete sichtbar werden, die Kavitation also bereits leicht, aber in akzeptablem, noch nicht schädlichem Maße ausgeprägt ist.

In **Bild 7** ist eine Anwendung für eine Francis-Turbine dargestellt [5]. Steigen die berechneten Sigma-Werte der Turbine (die nach rechts ansteigenden Linien) mit dem Durchfluss über den Sig-

ma-Wert der Anlage (horizontale Linie, weil sich das Anlagen-Sigma nicht mit dem Durchfluss verändert im Unterschied zur Turbine), dann tritt Kavitation ein. Voraussetzung ist die korrekte Annahme des Flächenanteils und damit des Grenzdrucks. In **Bild 7** sind die Sigma-Werte für verschiedene Leitschaufelstellungen (und somit Fallhöhen) in Abhängigkeit vom Durchfluss eingetragen, der zulässige Fahrbereich kann sofort entnommen werden. Dieses Bild wurde übrigens zur Problemlösung in einem Kraftwerk eingesetzt, und ein Umbau der Turbine beseitigte die zuvor beobachteten Kavitationsprobleme.

## 5 Grenzen der numerischen Berechnung

Es ist ziemlich leicht, den Kavitationsbeginn zu berechnen – natürlich mit dem Ziel, diesen zu vermeiden. Denn dann darf der statische Druck an keiner Stelle der Hydraulik bis auf den Dampfdruck absinken. Die Strömung bleibt also stets einphasig. Es ist im Übrigen nicht nur die Genauigkeit des Simulationscodes und die richtige Darstellung des Rechengitters, die eine zuverlässige

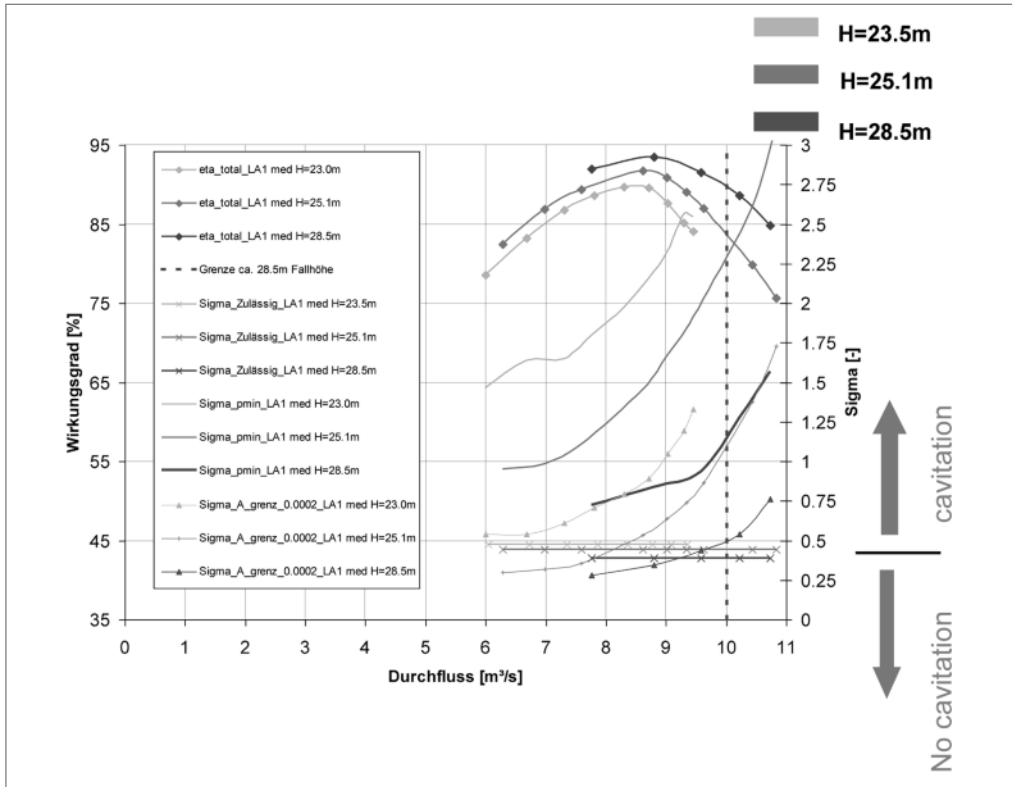


**Bild 6:** a) Vergleich gerechneter und gemessener Kavitationszonen [3]; b) Vergleich des gemessenen Kavitationskennfeldes einer Kaplan-Rohrturbine mit berechneten Sigma-Werten bei verschiedenen Schaufelstellungen

Aussage über den Kavitationsbeginn ermöglichen – vielmehr hängt es entscheidend vom Geschick des Bearbeiters ab, ob gute oder schlechte Berechnungsergebnisse gefunden werden. Alle Simulationscodes sind heutzutage so stabil, dass eigentlich immer ein konvergiertes Ergebnis gefunden wird. Es ist aber nicht a priori klar, dass dieses „Ergebnis“ die Wirklichkeit korrekt wiedergibt, so dass es auf die Sachkenntnis der Fach-

leute ankommt, die Ergebnisse richtig zu interpretieren und Maßnahmen zu treffen, die die Zuverlässigkeit der numerischen „Vorausberechnung“ – denn im Allgemeinen dreht es sich ja um die Neuauslegung von Maschinen – garantieren. Die Darstellung der ausgeprägten Kavitation ist im Vergleich zum Kavitationsbeginn immer viel schwieriger, weil streng genommen immer der Phasenübergang und die Kinetik der Flüssigkeit-Blasen-





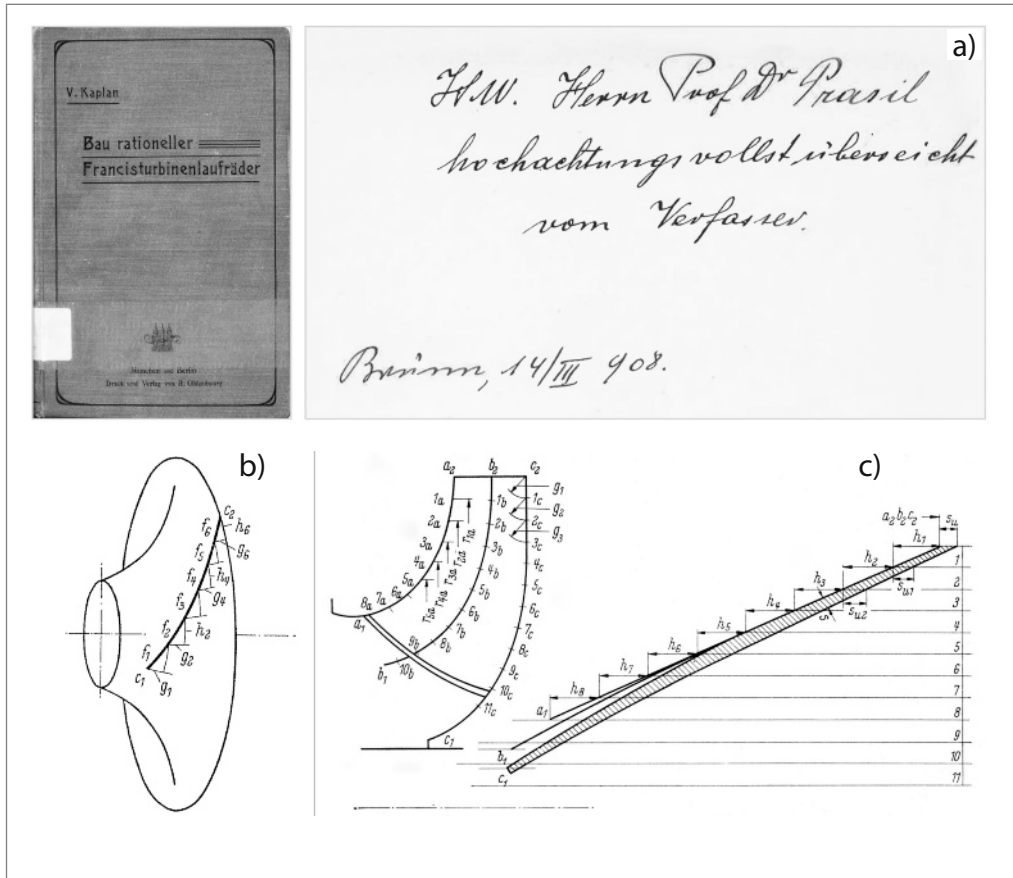
**Bild 7:** Verlauf der Thoma-Zahl einer Francis-Turbine und Vergleich mit den Anlagewerten für verschiedenen Leitradpositionen und Fallhöhen

Mischströmung mit all ihren Einflüssen beschrieben werden muss. Das Histogrammverfahren bietet hier die oben skizzierte ebenso überraschende wie zuverlässige Darstellungsmethode, hängt aber wie schon ausgeführt ebenfalls von der Sachkenntnis der bearbeitenden Person ab.

## 6 Das Kaplan'sche Konstruktionsverfahren

Die konstruktiven Verbesserungsmaßnahmen zur Optimierung des Kavitationsverhaltens der Kaplan-Turbinen waren Viktor Kaplan zugänglich, weil ihm einerseits die schon genannte Eisengießerei Storek den Aufbau eines hydraulischen Labors und die Durchführung einschlägiger Versuche ermöglichte, und weil andererseits bereits 1908 Viktor Kaplan sein berühmtes Konstruktionsverfahren für räumlich gekrümmte Schaufeln

entwickelt und im R. Oldenburg Verlag als Lehrbuch [6] publizierte. Ein Exemplar der Erstauflage widmete Kaplan seinem an der ETH Zürich wirkenden Kollegen Franz Prasil (**Bild 8a**), ebenfalls einem gebürtigen Steirer (Bad Radkersburg, 1857). Mit diesem (nota bene nicht patentfähigen) Verfahren war es Konstrukteuren von Strömungsmaschinen aller Art von Wasserturbinen über Gas- und Dampfturbinen bis hin zu Kreiselpumpen, Lüftern und Gebläsen radialer und axialer Bauart möglich, bis ins Detail die räumliche Erstreckung und Geometrie der Laufschaufeln darzustellen. Diese Darstellung hat auch heute noch in Zeiten der numerischen Strömungssimulation höchste Wichtigkeit bei allen (!) Strömungsmaschinen für die ebenso anschauliche wie korrekte Darstellung ihrer Schaufelgeometrie. Es ist unschwer zu erkennen, dass genau diese Methode Kaplan die nötigen Schaufelmodifikationen erlaubte, um die Verbesserung des Kavitationsver-



**Bild 8:** a) Veröffentlichung des Kaplan'schen Konstruktionsverfahrens mit Widmung; b) Dreidimensionale Stromlinie; c) Meridianschnitt und das konforme Abbild, die ebene Abbildung einer Schaufel mit korrekter Winkel- und Längendarstellung [7]

haltens zu erzielen. Man kann ohne Einschränkung festhalten, dass dieses Kaplan'sche Konstruktionsverfahren eigentlich eine noch viel größere und umfassendere Bedeutung hat als die Kaplan-Turbine selbst und somit sicherlich der größte Verdienst von Viktor Kaplan und seinem wissenschaftlichen Schaffen darstellt.

Im Wesentlichen ist es Viktor Kaplan gelungen, aus dem Meridianschnitt und dem Grundriss der Schaufel das sogenannte konforme Abbild herzuleiten (**Bilder 8b und 8c**), das eine winkel- und streckengetreue Abwicklung der räumlichen Stromlinie entlang der Schaufel in die Ebene erlaubt – eine wahrhaft geniale Idee. Und an der Form des konformen Abbildes kann der Hydraulik

sehr zuverlässig beurteilen, ob die Schaufel ein günstiges Strömungsverhalten aufweist und somit einen günstigen Wirkungsgrad und ein günstiges Kavitationsverhalten – oder nicht. Und umgekehrt ist es möglich, aus Meridianschnitt und konformem Abbild einen exakten Schaufelplan zu erzeugen, der die strömungstechnischen Erkenntnisse zuverlässig in eine ausgeführte Prototypschaufel überträgt. Es ist nicht untertrieben zu behaupten, dass dieses Kaplan'sche Konstruktionsverfahren die Ableitung von konstruktiven Verbesserungen zu Optimierung des Kavitationsverhaltens zumindest drastisch erleichterte, vielleicht sogar erst die Möglichkeit zur Verbesserung des Kavitationsverhaltens geschaffen hat.

Seine eigene geniale Entdeckung der korrekten zweidimensionalen, ebenen Darstellung einer dreidimensionalen Kontur – rund 100 Jahre vor den heute verfügbaren 3-D-Methoden (!) – hat es also Viktor Kaplan erlaubt, seine andere große Erfindung – die Kaplan-Turbine – gegen seine dritte große Entdeckung – die Kavitation in Wasserturbinen in technischem Maße resistent zu machen.

#### Autor

#### **O. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Helmut Jaberg**

Institut für Hydraulische Strömungsmaschinen  
Kopernikusgasse 24/IV  
8010 Graz, Österreich  
helmut.jaberg@tugraz.at

#### Literatur

- [1] Gehr, A.; Egger, A.; Riener, J.: Numerical and Experimental Investigation of the draft tube flow downstream of a bulb turbine. In: Proceedings of the 21<sup>st</sup> IAHR Symposium on Hydraulic Machines and Systems, Lausanne, 2002.
- [2] Gehr, A.; Benigni, H.; Köstenberger, M.: Unsteady Simulation of the Flow Through a Horizontal-Shaft Bulb Turbine. In: 22<sup>nd</sup> IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems, Stockholm, 2004.
- [3] Gehr, A.: KW Aschach – Berechnung und Optimierung des Laufrades mit numerischer Strömungsberechnung und evolutionsstrategischen Algorithmen. In: 32. Forschungsforum, Verbund, Wien, 2007.
- [4] Benigni, H.; Jaberg, H.: Bulb turbine simulation. Interner Bericht, HFM Institut für Hydraulische Strömungsmaschinen, Technische Universität Graz, 2006.
- [5] Benigni, H.; Meusburger, P.: Francis Turbine. Interner Bericht, HFM Institut für Hydraulische Strömungsmaschinen, Technische Universität Graz, 2007.
- [6] Kaplan, V.: Bau rationeller Francisturbinenlaufräder. München, Berlin: R. Oldenbourg, 1908.
- [7] Stepanoff, A. J.: Radial- und Axialpumpen. 2. A. Berlin: Springer-Verlag, 1959.

Helmut Jaberg

#### **Viktor Kaplan and his Ground-breaking Inventions – In Memory of the 100-year Jubilee of the Patent Submission**

On the occasion of 100 year jubilee of the Kaplan turbine a short overview of Viktor Kaplan's history is given and the significance of this turbine type, of the discovery of the cavitation in water turbines as well as the Kaplan design method for all kinds of fluid machinery is incurred. Modern simulation methods for cavitation are touched.

Хельмут Яберг

#### **Виктор Каплан и его новаторские изобретения – в ознаменование 100-летия подачи патентной заявки**

В ознаменование 100-летнего юбилея создания турбины Каплана кратко описывается путь становления Виктора Каплана. Отмечается значение турбин этого конструктивного типа, важность открытия явления кавитации в гидротурбинах и конструкционного метода Каплана для всех лопастных гидравлических машин. Затрагиваются аспекты современных методов расчета кавитации.

Gerlind Weber und Gunter Weber

# Viktor Kaplan – Höhen und Tiefen eines Erfinderlebens

„Die Natur enthüllt den Schleier ihrer Geheimnisse nur widerwillig und der Weg zum ersehnten Ziele ist mit Entbehrungen und zerstörten Hoffnungen hinreichend gekennzeichnet.“ Mit diesen Worten quittierte der österreichische Erfinder Viktor Kaplan rückschauend 1925 die Entwicklung der nach ihm benannten Turbine. Zwei seiner Enkel nehmen das Jubiläum „100 Jahre Kaplan-Turbine“ zum Anlass, die Höhen und Tiefen im Leben dieser großen Erfinderpersönlichkeit nachzuzeichnen.

## 1 Persönliches

„Liebe Oma, bitte schick‘ mir einen Opa“ – dieser Satz fand sich in so manchem Schriftstück, das in den sechziger und frühen siebziger Jahren in Wien oder Graz aufgegeben wurde und an Frau Professor Margarethe Kaplan in Unterach am Attersee adressiert war. Mit einem Stoßseufzer wurde sodann von der betagten Empfängerin eine Tausendschillingnote in ein Kuvert gesteckt, ein liebevoll-ermahnendes Begleitschreiben beigefügt und beides umgehend einem offensichtlich wieder in finanziellen Nöten steckenden Enkelkind an seinen Studienort zugesandt.

Der eingangs zitierte Satz hatte bei uns dreizehn, in dieser Zeit noch in Ausbildung befindlichen Kindeskindern Professor Viktor Kaplans und seiner Frau Margarethe den Status eines geflügelten Wortes. Er war die Anspielung auf die Tatsache, dass die Republik Österreich in den Jah-

ren 1962 bis 1972 einem der bislang wohl letzten großen Einzelerfinder symbolisch höchste Anerkennung zollte, indem sie das Portrait des Schöpfers der nach ihm benannten Turbine auf die eintausend Schillingnote setzte – und so wurde von uns Enkelkindern diese Banknote kurzerhand „Opa“ genannt (**Bild 1**).

Natürlich war unser berühmter Großvater in unseren Jugendjahren nicht nur als Symbol für ein begehrtes Zahlungsmittel präsent, sondern seine starke Persönlichkeit, seine Vorlieben und sein Wirken prägten auch noch Jahrzehnte nach seinem frühen Tod unser Heranwachsen. Dies wurde uns vor allem durch zwei Menschen vermittelt: Zunächst durch unsere Großmutter, Frau Margarethe Kaplan, der Gattin des Erfinders, und schließlich gleichermaßen durch unsere Mutter, Frau Dr. Gertraud Kaplan-Weber.

Margarethe Kaplan war eine Dame, die zeitlebens durch ihre außergewöhnliche Persönlichkeit



**Bild 1:** Österreichische 1000-Schilling-Note (1962 bis 1972)

bestochen hatte. Es war ihr in den 25 Jahren an der Seite eines großen Mannes der schwierige Trapezakt gelungen, einerseits ihren Gatten aufopferungsvoll zu unterstützen, andererseits aber auch ihre eigenen Talente und Interessen zu pflegen und sich zu einer äußerst interessanten Frau zu entwickeln. Nicht zuletzt war sie es, die nach dem Ableben ihres Mannes umsichtig die Vermögensangelegenheiten ordnete und das Gedenken an ihn wachhielt. So hatte sie etwa die Idee, den Vorzugsschülern der Viktor-Kaplan-Schule in Neuberg an der Mürz jährlich zum Schulschluss eine goldene Kaplan-Nadel in einem kleinen Festakt vor Ort zu überreichen, und im hochschulischen Bereich regte sie die Einrichtung eines Viktor-Kaplan-Stipendiums an, das jährlich an einige erfolgreiche Studierende der Technischen Universitäten von Wien und Graz verliehen wurde. Sie hielt bei diversen Kraftwerkseröffnungen launige Reden und zog noch im hohen Alter mit ihrem Geist und Charme ihre Umgebung voll in ihren Bann. Im Alltag war die „Frau Professor“, wie sie allgemein respektvoll genannt wurde, dagegen eine äußerst engagierte Großmutter, die tatkräftig ihre beiden Töchter bei der Erziehung ihrer jeweils großen Kinderschar unterstützte.

Unsere Mutter, die sehr empfindsam den Lebensweg ihres Vaters schriftlich nachzeichnete, schien Kaplan in vielen Eigenschaften sehr ähnlich zu sein, war sie doch wie er äußerst fleißig, bescheiden, naturverbunden, humorvoll und zäh. Ihrem persönlichen Arbeitseinsatz ist es weitgehend zu verdanken, dass der Landsitz Rochuspoint, den Kaplan 1920 in Unterach am Attersee erworben hatte, auch nach dem Krieg unter

völlig geänderten Rahmenbedingungen uns ein wundervolles Zuhause bot. Hier wuchsen wir heran und stolperten dabei buchstäblich auf Schritt und Tritt – äußerst unbefangen – über Spuren, die vom Wirken unseres Großvaters Zeugnis gaben und heute noch geben.

Das unveröffentlicht gebliebene Manuskript, das wegen des frühen Todes von Frau Dr. Gertraud Kaplan-Weber unvollendet geblieben ist, ist neben den vielen bewährten Quellen (s. u. a. [1] bis [13]) nun eine wertvolle Hilfe bei dem Versuch, ein plastisches, der Wirklichkeit möglichst nahe kommendes Lebensbild über eine große österreichische Erfinderpersönlichkeit zu zeichnen [14].

## 2 Familiäre Wurzeln und Heranwachsen

Wie so oft in der Donau-Monarchie hatten auch im Fall der Eltern Viktor Kaplans entsprechende Dienstzuteilungen überhaupt erst die Voraussetzungen geschaffen, dass sie einander begegnen konnten. So lebte Jenny Wust, die nachmalige Mutter Kaplans, im Haushalt ihres Schwagers, einem Verkehrsassistenten der Südbahngesellschaft im Mürztal, wo zur gleichen Zeit der aus der Wiener Neustadt stammende Carl Kaplan im Grade eines „Aushilfsbeamten“ seinen Dienst versah. Es war zunächst die Liebe zur Musik, die die beiden jungen Leute verband – sie spielten oft vierhändig Klavier miteinander. Nach zwei Jahren beschlossen sie zu heiraten. Dieser ausnehmend glücklichen Verbindung entsprangen drei Kinder. Viktor war das jüngste von ihnen.

Viktor Gustav Franz Kaplan erblickte am 27. November 1876 in der ziemlich bescheidenen Dienstwohnung seiner Eltern im Bahnhofsgebäude zu Mürzzuschlag am Semmering in der Obersteiermark das Licht der Welt. Als Kleinkind war er sehr empfindsam und soll viel geweint haben, so dass ihn die Mutter öfters mit den Worten in Schutz nahm: „Lasst mir meinen Wickerl in Ruh, aus dem wird noch was!“

Die Volksschule, deren Neubau aus den 1960er Jahren heute seinen Namen trägt, besuchte „Wickerl“ in Neuberg an der Mürz (**Bild 2a**). In dieser kleinen obersteirischen Gemeinde besaß das Kaiserhaus ein Jagdgut, das Franz Joseph I. gerne auf-



**Bild 2a:** Wickerl in der Volksschule Neuberg





**Bild 2b:** Kaplans Tarockrunde zum Fetten Schwein

suchte. In der Nähe der Majestät waren gute Umgangsformen gefragt, und über solche verfügend, wurde Carl Kaplan bald zum Neuberger Bahnhofsvorstand befördert.

Die alpine Landschaft prägte wohl die Vorlieben des heranwachsenden Buben, die er zeitlebens beibehielt: die Liebe zu den Bergen und zu den Wasserläufen. Kaplan wanderte gerne und bastelte schon als Knabe mit seinen Freunden unzählige Wasserräder. Doch schon nach fünf Jahren hieß es Abschied nehmen von dieser ländlichen Idylle. Vater Carl Kaplan wurde zum Vorstand des Matzleinsdorfer Frachtenbahnhofes in Wien bestellt. Dieses berufliche Avancement trug sich vortrefflich mit der Absicht, Viktor zum Besuch einer Mittelschule einschreiben zu lassen.

Als Schüler der Walter-Realschule im 4. Wiener Gemeindebezirk zeigte sich bereits deutlich Kaplans hohe Begabung in den naturwissenschaftlichen Fächern, wie Mathematik, Physik und Geometrisch Zeichnen, während Deutsch, Englisch oder Geschichte nicht gerade seine Sache waren. Seine aus dieser Zeit stammenden geschickten Basteleien sind mittlerweile geradezu schon Legende. Das berühmteste Beispiel ist wohl ein aus wenigen Alltagsgegenständen zusammengebauter Fotoapparat: „Der Balg war ein alter Gummiregenmantel, das Objektiv war eine Linse um 60 Kreuzer, zwei Wochen zusammengespart! Die

Linse wurde in eine Schuhschachtel gegeben, der Deckel dieser Schachtel war gleichzeitig der Objektiveckel. Die Schraube, welche die Distanz einstellt, war ein alter Drillbohrer. Die Aufnahmen konnten immerhin als brauchbar bezeichnet werden.“ (Kaplan, zitiert bei [9]).

Dennoch war Viktor kein grübelnder Stubenhocker, sondern ein zu vielen Streichen aufgelegter sportiver Jüngling mit keinem allzu großen Interesse an schulischen Belangen. Doch schließlich war auch die Matura geschafft. Diese Prüfung war zu Kaplans Zeiten äußerst schwierig, und so soll der Erfinder auch noch in fortgeschrittenem Alter von seiner Reifeprüfung geträumt und gesprochen haben. Er beherrschte auch als reifer Mann noch die Namen seiner Mitschüler in alphabetischer Reihenfolge und fühlte sich seinen Freunden aus der Volks- und Mittelschulzeit zeitlebens verbunden, indem er brieflich die Kontakte pflegte und sie immer wieder zu sich lud.

### 3 Studien und Militärzeit

Nach Abschluss des Gymnasiums war es naheliegend, dass sich Kaplan für das Ergreifen einer technischen Studienrichtung entschied. Er entschloss sich für das Fach Maschinenbau an der Technischen Hochschule in Wien. Da dieses Stu-

dium ganz seinen Begabungen entsprach, konnte er ohne Schwierigkeiten den gestellten Anforderungen gerecht werden und fand zudem genug Zeit, sich ausgiebig Freizeitbeschäftigungen zu widmen. So gründete er eine Tarockrunde (**Bild 2b**) und war mittlerweile ein guter Tennisspieler und ein ausgezeichneter Schlittschuhläufer. Während der Sommerferien fuhr er viel Rad und machte ausgedehnte Bergtouren. Als Hochalpinist zog es ihn hier besonders nach Südtirol, wo sein Cousin auf der Seiseralp das noch heute existierende Frommerhaus als Hotel führte. Die landschaftliche Schönheit Südtirols quittierte er stets mit der Bemerkung, dass „dort erst die Natur anfange“.

Nach fünfjähriger Studienzeit schloss Kaplan im Jahr 1900 sein Studium als Diplomingenieur für Maschinenbau ab. Anschließend wartete das Militär auf ihn, und er ging ein Jahr zur Marine nach Pola. Als ein Mensch, der wie immer geartete gesellschaftliche Zwänge ablehnte, ging ihm der militärische Drill begreiflicherweise ziemlich gegen den Strich. Er belustigte sich später darüber, indem er gelegentlich einen Merksatz zum Besten gab, den angeblich einer der Vorgesetzten den Ingenieureleven eingetrichtert haben soll: „Und wenn ihr gefragt werdet, wer ist größer Napoleon oder Bonaparte?, so hat die Antwort zu lauten: Jawoll!“

### Schicksalhafte Hindernisse

Im Winter 1901 trat Kaplan als Ingenieur in die Maschinenfabrik Ganz & Co in Leobersdorf ein, eine Firma, die sich zu dieser Zeit auf den Bau von Dieselmotoren spezialisiert hatte. Den regen Geist des jungen Mannes beschäftigte alsbald die Tatsache, dass ein hoher Anteil der Leistungen dieser Motoren als Abwärme verlorengeht. Er machte sich daran, diesem Umstand beizukommen, und konstruierte einen grundlegend neuen Motor, bei dem kurz nach der Zündung komprimiertes Gas in den Zylinder eingespritzt wird. Dieses neue Verfahren meldete er auch gleich zum Patent an. Völlig arglos gegenüber den wirtschaftlichen Interessen seines Arbeitgebers ging Kaplan mit seinen Ideen mehrmals an die Öffentlichkeit, und so kam, was kommen musste: Nach einem Vortrag über seinen Einspritz-Explosionsmotor im Österreichischen Ingenieur- und Architektenverein im März 1903 erreichte ihn auf einem Kurzurlaub die Kün-

digung. Es kam zwar in der Folge zu einer Aussprache zwischen dem darüber tief bestürzten Kaplan und der Firmenleitung, worauf die Kündigung zurückgenommen wurde. Kaplan blieb aber über den ihm von der Arbeitgeberseite verhängten „Maulkorb“ unglücklich und suchte von sich aus den Absprung. Doch ein Unglück kommt selten allein: Kaplans theoretisch gehaltene Überlegungen zum Einspritz-Explosionsmotor, die er als Dissertation an der Technischen Hochschule in Wien eingereicht hatte, wurden zum Zweck der experimentellen Untermauerung mit Bescheid zurückgestellt.

Verständlicherweise war der junge engagierte Ingenieur aufgrund dieser Ereignisse niedergeschlagen. Da Viktor Kaplan während seiner Studienzeit seine Mutter verlor – sie starb 1898 mit nur 55 Jahren – lag es am Vater seinem Sohn Mut zuzusprechen. Dieser versuchte ihn mit tröstenden und sehr weisen Worten wieder aufzurichten, wenn er etwa in einem Brief schrieb: „Überall wird man von Dir eine längere Praxis, eine erfolgreiche berufliche Tätigkeit verlangen, mit dem Dokortitel allein wirst Du nicht weit kommen. Ich rate Dir daher, zuerst eine intensive Berufstätigkeit zu entwickeln, zu trachten, dass Du eventuell im Auslande Deine Kenntnisse erweiterst, ein junger Mann, der nichts in der Welt mitgemacht, nichts gesehen hat, kann anderen kein Professor sein, denn nur aus dem Keim der Praxis können die technischen Wissenschaften sich weiterentwickeln.“ [9]. Kaplan ließ sich von diesem Ratschlag tatsächlich leiten und baute in Zukunft seine Arbeiten konsequent auf der Synthese zwischen Theorie und Experiment auf. „Grau, teurer Freund, ist alle Theorie“ – dieses faustische Wort wurde einer seiner oft gebrauchten Stehsätze (**Bild 2c**).

### Neue Perspektiven

Der Zufall wollte es, dass Professor Donath von der Deutschen Technischen Hochschule in Brünn in Leobersdorf weilte und der dortige Stationsvorstand diesem von einem jungen Ingenieur erzählte, der gerade eine Stelle suche. Donath gab den Hinweis, dass einer seiner Kollegen, Professor Alfred Musil – der Vater des Dichters Robert Musil – eine Konstruktorsstelle zu besetzen hätte. Viktor Kaplan bewarb sich darum und konnte tatsächlich Ende Oktober 1903 seine Arbeit an der



**Bild 2c:** Viktor Kaplan als junger Ingenieur



**Bild 2d:** Margarethe Kaplan, geborene Strasser, seine Frau

Lehrkanzel für Maschinenlehre, Kinematik und Maschinenkunde an der Deutschen Technischen Hochschule in Brünn (DTH Brünn) aufnehmen.

Musil wurde der richtige Vorgesetzte für Kaplan. Er unterstützte die Ambitionen seines rühri- gen Mitarbeiters wo er konnte und betraute sei- nen Konstrukteur alsbald auch mit der Abhaltung der Vorlesung aus Maschinenkunde. In For- schungsbelangen wandte sich Kaplan einem zu je- ner Zeit brennenden Problem zu: der effizienteren Nutzung der Wasserkraft. Damit stürzte er sich in eine Sache, die viele der großen Maschinenher- steller und Fachleute der damaligen Zeit stark be- schäftigte.

Durch die Einführung des Mehrphasenstroms war es damals erst seit wenigen Jahren möglich, elektrischen Strom über größere Entfernungen zu transportieren. Diese technische Errungenschaft hob den Zwang auf, Produktionsstätten nur an für die Energiegewinnung geeigneten Wasserläufen anzusiedeln, wo die im Einsatz befindlichen rela- tiv leistungsschwachen Turbinen über Transmissi- onen die jeweiligen Arbeitsmaschinen direkt an- trieben. Mit der Leitbarkeit elektrischer Energie über weite Distanzen wurde nun verständlicher- weise der Wunsch geweckt, die in Strömen und



**Bild 2e:** Heinrich Storek, der Förderer

Flüssen gebundenen Kräfte im großen Umfang zur Elektrizitätsgewinnung zu nützen und die Energie auch an entfernte Arbeitsstätten und Haushalte zu verschicken. Dafür standen damals zwei Wasserturbinentypen im Einsatz: Zum einen das 1880 durch L. A. Pelton, einen Amerikaner, erfundene „Peltonrad“. Es handelt sich dabei um eine tangential angeströmte Freistrahlturbine, bei der das Wasser aus einer oder mehreren Düsen unter hohem Druck auf die Halbschalen des Laufrades trifft. Sie kam und kommt bis heute bei Wasserläufen mit hohem Gefälle und geringen Wassermengen zum Einsatz. Für Wasserkraftwerke an Fließgewässern mit geringem Gefälle und großen Wassermengen setzte man zum anderen auf die 1868 vom Amerikaner J. B. Francis erfundene „Francis-Turbine“. Bei diesem Turbinentyp kontrolliert ein Leitrad die Wasserzufuhr und lenkt den Wasserstrom auf ein zellenförmiges Laufrad. Das Problem war, dass die Drehzahl der Francis-Turbinen bei geringen Wassergefällen oft zu niedrig war, um die elektrischen Drehstromgeneratoren anzutreiben. Häufig waren große Übersetzungsgetriebe zur Erhöhung der Turbinendrehzahl notwendig, die sich als störanfällig erwiesen und die Kosten erhöhten. Eine weitere Unzulänglichkeit war zudem, dass der Wirkungsgrad von Francis-Turbinen bei Verringerung der Wassermenge schnell abnahm. Um auch bei Niedrigwasser entsprechende Leistungen zu erzielen, mussten daher häufig mehrere kleine Turbinensätze gebaut werden, von denen bei wenig anfallender Wassermenge einige einfach abgeschaltet wurden. Es waren somit vor allem wirtschaftliche Überlegungen, die dazu führten, dass seit der Jahrhundertwende weltweit mit viel Einsatz nach neuen schnelllaufenden Turbinentypen geforscht wurde.

In diesen Wettlauf um die Verbesserung der Wasserkraftmaschinen klinkte sich auch Viktor Kaplan ein, war er doch schon während seiner ersten Anstellung bei Ganz & Co. in Leobersdorf auch mit der Konstruktion von Francis-Turbinen-Schaufeln befasst gewesen. Aus heutiger Sicht war dies ein Schritt ins höchst Ungewisse, da es an Kaplans neuer Arbeitsstätte keine materiellen Voraussetzungen gab, die diese Ambition nahelegten oder unterstützten – ganz im Gegensatz zu den großen Maschinenfabriken, die aufwendige Versuchslaboratorien unterhielten und im Kampf um die ökonomischere Ausbeutung des „weißen Gol-

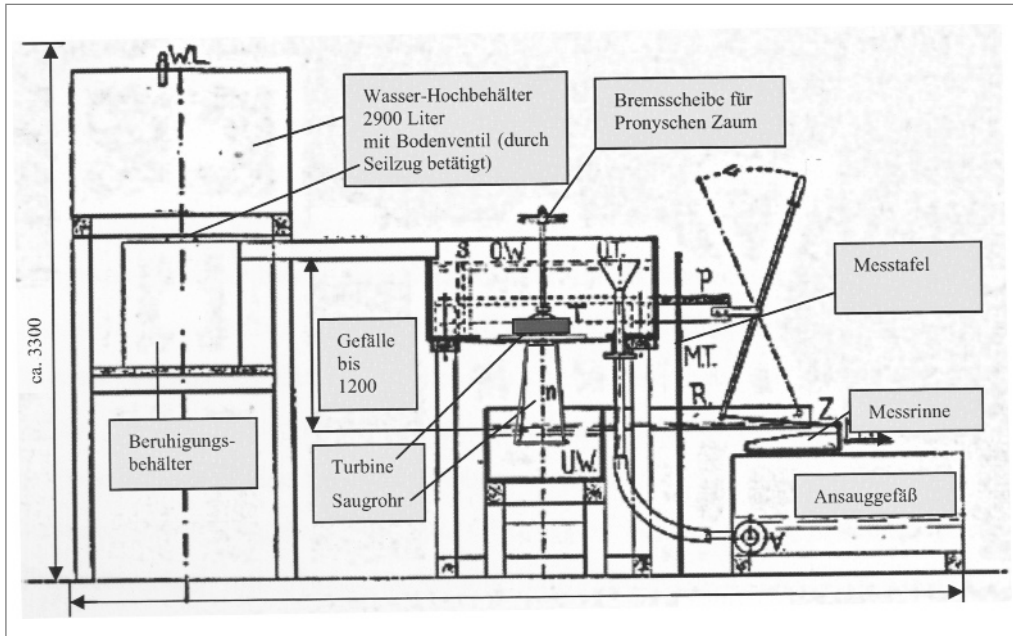
des“ den Ton angaben. In Ermangelung eines Versuchsstandes an der DTH Brunn war Kaplan fürs Erste gezwungen, seine Experimente zur Verbesserung der Leistung von Turbinenschnellläufern nicht mit Wasser, sondern mit Luft durchzuführen. Er beschrieb diese bescheidenen Anfänge wie folgt: „... da wir leider keine eigene Versuchsanstalt besaßen, so mussten häusliche Gebrauchsgegenstände für die Versuche herhalten. Ein geheizter eiserner Ofen ergab den erforderlichen Luftzug nach oben und ein Rädchen mit papierernen Schaufeln bildete die Grundlage zu den Forschungen über die Schnellläufigkeit.“ [5].

Trotz dieser widrigen Voraussetzungen unterrichtete Kaplan seit 1905 die Öffentlichkeit laufend in Fachpublikationen und Vorträgen von seinen Überlegungen zur Verbesserung der Francis-Turbine. Mit fortschreitender Vertiefung in dieses Thema wurde das Fehlen eines Turbinenlaboratoriums zum Zwecke der experimentellen Untermauerung seiner theoretischen Ausführungen jedoch immer unhaltbarer. Kaplan trat daher an seinen Chef, Professor Musil, mit dem Vorschlag heran, in den Kellerräumlichkeiten des Instituts eine kleine Versuchsanstalt einrichten zu dürfen. Musil zeigte Verständnis für den Wunsch seines Mitarbeiters, und so begann ein mühsamer, zeitaufwendiger Kampf beider Herren, bei dem einerseits das Professorenkollegium von der Sinnhaftigkeit dieser Einrichtung für die Hochschule überzeugt werden musste und andererseits die Industrie zur freiwilligen Beistellung der erforderlichen Sachleistungen und Ausführungsarbeiten zu bewegen war.

#### 4 Beruflicher Erfolg und privates Glück

Im Jahr 1908 erschien das erste Buch Kaplans unter dem Titel „Bau rationeller Francisturbinenlaufräder“. Aufgrund dieser Veröffentlichung hörte erstmals eine hübsche junge Wienerin namens Margarethe Strasser von der Existenz Viktor Kaplans. Dies freilich ohne zu ahnen, dass der strebsame Forscher binnen Jahresfrist ihr Ehemann sein würde. Ihr jüngerer Bruder, Anton Strasser, ein Maschinenbaustudent an der Technischen Hochschule Wien, erzählte nämlich zu Hause, dass der angesehene Professor Budau



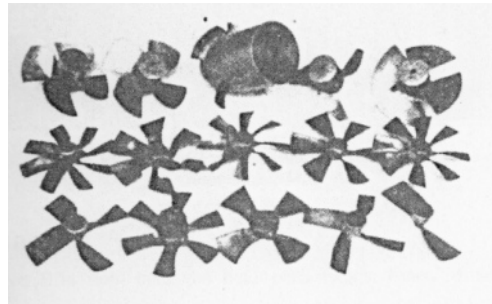


**Bild 3a:** Kaplan-Versuchsturbine an der DTH Brunn

Kaplan's Buch in der Vorlesung vorgestellt und zum Studium empfohlen hatte. Den Autor dieses Werkes hatte er mit der Bemerkung gelobt: „Aus dem wird noch was!“ Die damals fünfundzwanzigjährige Margarethe dachte sich: „Warum kann ich nicht solche Menschen kennenlernen?!“

Doch das Schicksal sollte die beiden bald zueinander führen. Es fügte sich, dass Grete Strasser und Viktor Kaplan zur selben Zeit auf dem Schiff „Thalia“ eine Nordlandreise unternahmen, und es blieb nicht aus, dass die zwei jungen Leute sich kennenlernten und offensichtlich aneinander Gefallen fanden. Auf den ersten Blick waren sie sich in vielem ähnlich: sie sprühten vor Geist und Charme und fühlten sich als Mittelpunkt einer Runde sehr wohl, zudem waren beide sehr attraktive Erscheinungen. Nach Hause zurückgekehrt widmete Kaplan der verehrten Dame zum Abschied sein Buch mit dem wohl einzigen Vers, der jemals seiner Feder entsprang:

Sinnend oft saß ich an Baches Rand  
Und horchte der murmelnden Laute.  
Und als ich die Sprache des Bächleins  
verstand –  
die Weisheit der Schöpfung mit Ehrfurcht  
empfund –



**Bild 3b:** Versuchsserie von Laufrädern

Da ging ich – und schrieb, was ich schaute. Vielleicht war es das private Glück, die Energie, die man aus der Verliebtheit zieht, dass Kaplan alles gelang, was er in dieser Zeit anpackte. So wurde ihm von der Hochschulleitung im Frühjahr 1909 die Erlaubnis erteilt, das ersehnte Turbinenlaboratorium einzurichten, sein Werk „Bau rationeller Francisturbinenlaufräder“, als Doktorarbeit an der Technischen Hochschule Wien eingereicht, wurde klaglos approbiert, und Kaplan erlangte im Frühjahr 1909 als Dreiunddreißigjähriger den Grad eines Doktors der Technischen Wissenschaften. Dem nicht genug: Noch im selben Jahr erfolgte



seine Habilitation für Wasserkraftmaschinen an der DTH Brünn. Er wurde zum Adjunkten bestellt, was heute dem Dienstgrad eines Universitätsdozenten entspricht.

1909 war aber auch das Jahr, in dem sich Kaplan mit Grete Strasser, die die Tochter eines wohlhabenden Wiener Tuchhändlers war, vermählte (**Bild 2d**). Damit wurde eine Verbindung zweier starker Persönlichkeiten besiegelt, die ihre Qualität wohl auch aus der Spannung der Gegensätzlichkeit beider Charaktere bezog. Margarethe Kaplan war stets den schönen Künsten zugetan und legte großen Wert auf gute Umgangsformen sowie ein gediegenes Ambiente. Zudem gehörte sie zu jenen Frauen, die immer adrett, verbunden mit einem Hauch von Extravaganz gekleidet waren. Ihr „Wickerl“ hingegen hatte keinerlei Interesse an der Kunst und strafte die Ausübenden mit seiner unverhohlenen Geringschätzung. Die Bestrebungen seiner Frau, ein Heim mit ansprechender Atmosphäre zu schaffen, waren ihm immer wieder Anlass für Neckereien, und gelegentlich durchkreuzte er mit Schalk ihre einschlägigen Bemühungen. Über gesellschaftliche Etikette setzte er sich gerne hinweg. Beispielsweise legte er keinerlei Wert auf sein Äußeres, und so musste ihm seine Frau zeitweilig heimlich in der Nacht die Kleidungsstücke auswechseln. Im Kern war jedoch die Beziehung von gegenseitiger Liebe sowie tiefer Wertschätzung geprägt und ließ beiden Ehepartnern genügend Spielraum, die jeweils eigenen Vorlieben zu leben. Schon 1910 wurde ihr erstes Glück durch die Geburt ihrer Tochter Grete gekrönt.

### Eigener Weg

Es war vor allem der Firmenchef der Stahlhütte Storek in Brünn, Dipl.-Ing. Heinrich Storek (**Bild 2e**), der Kaplan aus der Sicht der Industrie unterstützte, wo er konnte. So war es neben anderen Unternehmen in erster Linie der Firma Storek zu verdanken, dass Kaplan 1910 auch das Turbinenlaboratorium in Betrieb nehmen konnte. Zeuge dieses Ereignisses wurde zufällig Edwin Storek, der Sohn des Genannten und zum damaligen Zeitpunkt Maschinenbaustudent an der DTH Brünn: „Kaplan stand am Hebel, um den Kegel des Ablasses zu heben, es ging nicht, wie er auch zog und drückte. Als ich zur Hilfe gerufen wurde, ging es zu viel, bald schwamm der ganze Keller, ich stand bis zu den Knöcheln im Wasser, während er unbe-

kümmert auf das Oberwasserreservoir geklettert war und gebannt das Drehen der Turbine und das Strömen des zu- und ablaufenden Wassers verfolgte ...“ [9].

Das kleine, bescheiden ausgestattete Laboratorium war nach eigenen Überlegungen und Berechnungen Kaplans gestaltet. Es bestand aus Holz und bot den darin Arbeitenden wenig Bequemlichkeit. Von einem Hochbehälter strömte das Wasser in einen Oberwasserkasten, von dort durch das Leit- und Schaufelrad der Turbine über das Saugrohr in den Unterwasserkasten, von wo es durch eine Kreiselpumpe in den Hochbehälter zurückbefördert wurde. Das Saugrohr war aus Glas, sodass die Wasserströmung, durch Hanffäden sichtbar gemacht, beobachtet werden konnte (**Bild 3a**).

Aufgrund äußerst beschränkter finanzieller Möglichkeiten war alles sehr klein gehalten. Kaplan experimentierte zunächst mit Laufrädern von nur 100 mm Durchmesser, später wählte er 184 mm. Rückblickend war die Kleinheit der Versuchseinrichtung aber offenbar entscheidend für den Vorsprung gewesen, den Kaplan im extrem kompetitiv geführten Rennen um die Verbesserung der Schnelligkeit von Turbinen gegenüber den großen Versuchsanstalten erzielte. Er selbst rechnete rückblickend vor: „Eine rohe Überschlagsrechnung hat gezeigt, dass zur Herstellung eines großen Rades genau so viele Monate vergehen, als ich Tage benötigte. Die Montage des kleinen Rades erfordert zehn Minuten, die des großen etwa fünf Stunden, also in beiden Fällen dreißigmal solange.“ [5].

Kaplan untersuchte vorerst Francis-Versuchsturbinen, deren Teile er bei der Firma Storek fertigen ließ. In hunderten Experimenten erkannte er, dass es wegen der Reibungsverluste nicht möglich war, die Turbinendrehzahl ohne eine drastische Verringerung des Wirkungsgrades zu erhöhen. In Kenntnis dieses Zusammenhanges ging Kaplan daran, die äußere Laufradbegrenzung der Francis-Turbine wegzulassen. In einem nächsten Schritt verringerte er die Anzahl der Schaufeln des Laufrades. Eine Unzahl von Untersuchungsreihen war schließlich der optimalen Anzahl der Schaufeln und dem besten Verhältnis zwischen ihrer Länge und Breite gewidmet. So kristallisierte sich nach und nach ein Flügelrad heraus, das mit dem Francis-Laufrad keinerlei Ähnlichkeit mehr hatte.

Doch es genügte nicht, sich nur mit der Frage des Laufrades zu beschäftigen, es musste auch ein neues Saugrohr entwickelt werden, und zudem war es notwendig, die optimale Abstimmung zwischen den Komponenten Leitschaufeln, Laufrad und Saugrohr zu finden. Insgesamt führte Kaplan schätzungsweise 2 500 bis 3 000 Versuchsanordnungen durch. Natürlich galt es auch, die auf experimentellem Wege gefundenen Einsichten mit theoretischen Überlegungen abzusichern, denn Ziel war es ja, allgemeingültige Gesetzmäßigkeiten für den Kraftwerksbau anbieten zu können. Nachdem Kaplan seit 1909 mit seinen durch zeitraubende Versuchsreihen gewonnenen Erkenntnissen nicht mehr an die Öffentlichkeit gegangen war, überraschte er schließlich die Fachwelt damit, dass er im Dezember 1912 einen völlig neuen Wasserkraftmaschinentyp zur Patentierung anmeldete (Bild 3b).



**Bild 4a:** Kaplan zur Zeit seiner Erfindung

## 5 Entscheidende Entwicklungen

Die von Kaplan zum Patent angemeldete Turbine hatte noch feste Laufradschaufeln und wies damit den erheblichen Nachteil auf, dass bei Verringerung des optimalen Wasserzuflusses ihr Wirkungsgrad rasch absank. Ein Umstand, der ihre Bewährung in der Praxis stark einschränken würde. Kaplan musste dieses Problem lösen (Bild 4a). Im April 1913 war es soweit: Er trat an das Wochenbett seiner Frau, die ihm wenige Tage zuvor Tochter Gertraud geboren hatte, mit den erlösenden Worten: „Greterl, ich hab's!“ Freudig erzählte er seiner Frau von der Idee, die Laufradschaufeln drehbar um Naben am Laufradkörper anordnen zu wollen. – Damit war Kaplan gedanklich der Durchbruch geglückt. Durch die Veränderung der Schaufelstellung, die, und das ist entscheidend, auch während des Betriebes durchgeführt werden kann, ist es möglich, die Laufradform der jeweiligen Wassermenge anzupassen. Damit arbeitet die Turbine auch bei einer Verringerung des Wasserdurchsatzes konstant mit hohem Wirkungsgrad. Die eigentliche „Kaplan-Turbine“ war erfunden!

Schon wenige Wochen später leitete Kaplan die kommerzielle Verwertung seiner Turbine ein. Damit entschied er sich für eine Gratwanderung zwischen Offenlegung und Geheimhaltung seiner Er-



**Bild 4b:** Jaroslav Slavik, Kaplans Assistent



**Bild 5:** Erste Kaplan-Turbine der Welt

findung, wünschte er doch einerseits die rasche Bewährung seiner Wasserkraftmaschine in der Praxis, andererseits wollte er aber keineswegs sein noch nicht patentrechtlich geschütztes geistiges Eigentum vorschnell preisgeben. Mitte Mai 1913 unterrichtete Kaplan alle bedeutenden Maschinenhersteller schriftlich von der neuen Turbine, teilte seine Versuchsergebnisse mit und lud deren Vertreter zu einer Vorführung, einer sogenannten Bremsprobe, in sein kleines Laboratorium nach Brunn ein, wo er sie zum Erwerb von Lizenzrechten an seiner Erfindung aufforderte.

Viele der Firmen zögerten, die Einladung des Hochschullehrers überhaupt anzunehmen, da sie seinen Ergebnissen keinen Glauben schenken wollten. Schließlich kamen aber doch Techniker aus Frankreich, Schweden, Norwegen, Deutschland, der Schweiz, den Vereinigten Staaten von Amerika, Japan und Russland angereist, um Zeugen der ersten anberaumten Bremsprobe einer Kaplan-Turbine für Außenstehende zu werden. Kaplan beschrieb dieses wichtige Ereignis wie folgt: „Jeder der Versuchsingenieure kam mit einer gewissen Dosis an Misstrauen an, das sich noch steigerte, als ich die Besichtigung des Rades ablehnte. Recht heiter stimmten mich dann die

Bremsproben. Jeder Bremshebel wurde mathematisch genau gemessen und das Tachometer, die Stoppuhr, die Gefällsmessung bis auf die Nieren hinein geprüft und schließlich die erste Bremsung vorgenommen. ... Je mehr sich diese Vertreter von der Stichhaltigkeit der Kaplantheorie überzeugen ließen, um so größeren Widerständen begegnete der Vertragsabschluss, denn dem berechtigten Wunsch das Laufrad bzw. die Patentanmeldung zu sehen, begegnete ich mit dem nicht minder gerechtfertigten Einwande, dass ich nicht gewillt sei, die technische Neugier irgendeiner auf dem Gebiet des Schnellläuferbaus führenden Firma zu befriedigen und so ihre Bestrebungen in dem Baue schnelllaufender Turbinen kostenlos zu fördern.“ [5].

Was Kaplan zu diesem Zeitpunkt noch nicht wissen konnte, war, dass dieser Tag der symbolische Auftakt zu einem beinhalten Kampf werden sollte, zwischen einem Einzelerfinder, der von der Tauglichkeit seiner Schöpfung felsenfest überzeugt war, auf der einen Seite und mächtigen Industriekonzernen, die nicht die „Katze im Sack“ kaufen wollten, auf der anderen. Doch noch herrschte Ruhe vor dem Sturm: Kaplan meldete Anfang August 1913 seine „Kreiselmaschine mit



**Bild 6a:** Landgut Rochuspoint

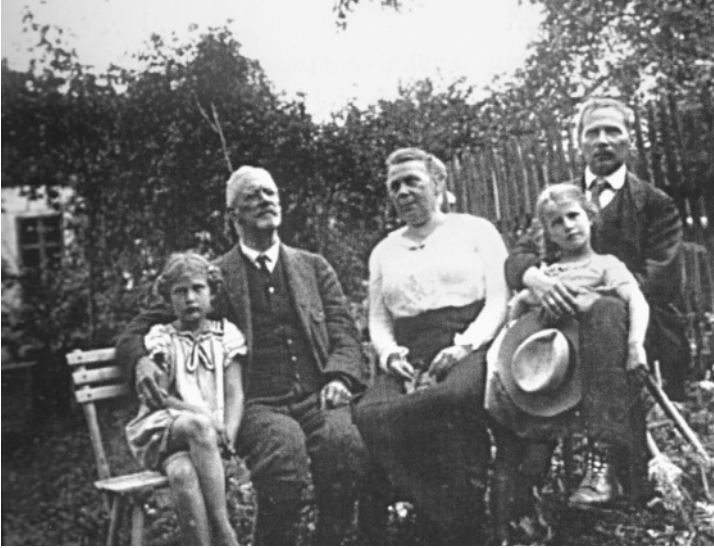
drehbaren Laufradschaufeln“ zum Patent an. Auch auf der Hochschule gelang ihm noch im selben Jahr ein bemerkenswerter Karriereschritt: Kaplan wurde zum „außerordentlich öffentlichen Professor für Maschinenbau mit besonderem Bezug zu Wasserturbinen“ ernannt und Vorstand einer eigenen Lehrkanzel. Damit eröffnete sich für ihn die Möglichkeit, selbst wissenschaftliche Mitarbeiter heranzubilden.

Auffallend exakte technische Zeichnungen, die in einem Schaukasten im Gang der DTH Brunn ausgestellt waren, machten Kaplan auf den Studenten Jaroslav Slavik (**Bild 4b**) aufmerksam, aus dessen Feder diese Darstellungen stammten. Mit der Anstellung dieses jungen Mannes hatte der Professor einen überaus guten Griff bewiesen, wurde doch Slavik im Weiteren ein durch und durch loyaler Helfer, dessen Stunden der äußersten Bewährung noch kommen sollten. Zuerst aber wartete auf den ambitionierten Mitarbeiter die Aufgabe, den Erfinder bei der Ausfertigung der Patentzeichnungen behilflich zu sein, eine ausgesprochen zeitraubende Angelegenheit, da die Pläne genau nach den jeweiligen nationalen Vorschriften in den Einreichstaaten abgefasst werden mussten.

## 6 Schwere Zeiten und der Erfolg

Mit fünf Firmen konnte Kaplan noch vor Ausbruch des Ersten Weltkriegs Lizenzverträge abschließen. Die großen deutschen und Schweizer Turbinenhersteller formierten sich jedoch zu einem „Anti-Kaplan-Syndikat“, indem sie vereinbarten, zunächst gemeinsam gegen die angemeldeten Patente Kaplans vorzugehen. Auf diese Weise wollten sie eine genaue Prüfung der Erfindung erzwingen. Mit diesem Beschluss wurde ein jahrelanger zermürender Kampf zwischen David und Goliath vom Zaun gebrochen, deren „Spielregeln“ der Erfinder rückblickend wie folgt beschrieb: „Fast jede Woche brachte mir irgend einen neuen Einspruch, sei es in Österreich, sei es in Deutschland, wobei sich selbstverständlich die entsprechenden Firmen eine entsprechende Arbeitsteilung zurechtlegten, so dass die eine sich hauptsächlich mit theoretischen Fragen, die andere mit angeblich neuheitsschädlichen amerikanischen Bauweisen, die dritte wieder mit angeblichen Vorbenutzungsrechten usw. beschäftigte. In allen Eingaben war das sonst getrennt marschierende Syndikat darin einig, dass sich der von mir angegebene Fortschritt nicht erzielen ließe





**Bild 6b:** Viktor Kaplan mit Vater, Stiefmutter und beiden Töchtern

und schon aus diesem Grund das Patent versagt werden müsse.“ [2].

Kaplan musste seine Zeit, sein Geld und seine Nervenkraft an – wie er selbst meinte – „nicht ernstzunehmende Schriftstücke vergeuden“ und sich entschlossen gegen unqualifizierte, auch von Einzelpersonen laufend öffentlich vorgebrachte Einwände wehren. Dass er dabei durchaus auch die spitze Feder einzusetzen wusste, zeigt etwa folgendes Zitat: „Als Antwort auf derartige unwissenschaftliche Angriffe, kann ich dem Herrn Einsender nur dringend raten, die neuere Turbinenliteratur, die sich sicherlich auch in der Bibliothek seiner Gewerbeschule vorfinden dürfte, einem eingehenderem Studium zu unterziehen, da ich es im Hinblick auf den mitgeteilten Brief ablehnen muss, mich mit dem Herrn Einsender in eine ernste wissenschaftliche Diskussion einzulassen.“ [2].

Von der gegnerischen Seite wurde der um die Früchte seines Lebenswerkes Kämpfende etwa so gesehen: „Ihn [gemeint ist Kaplan] beherrscht eben der unglückliche, alles Maß überschreitende Optimismus, den man so häufig bei Erfindern antrifft, die kein Hindernis sehen, keine nüchterne Erwägung gelten lassen und alle Einwendungen, ja sogar das nicht bedingungslose Mitgehen als Einfluss feindlicher Gesinnung betrachten.“ [12].

Kaplan wusste, dass seine Kritiker letztlich nur die praktische Bewährung seiner Turbine von ih-

rer revolutionären Leistungsfähigkeit würde überzeugen können. Deshalb machte er sich auf die Suche nach einem Unternehmen, das sich bereit fand, das Wagnis, das mit dem Einsatz einer neuen Technologie stets verbunden ist, auf sich zu nehmen. Wie in seinen Patentstreitigkeiten kam auch hier Beistand aus der Familie seiner Frau: Sein Schwager Dipl.- Ing. Anton Strasser konnte Verwandte, Eigentümer einer Strickgarnfabrik im niederösterreichischen Velm überreden, das ausgediente Wasserrad am „Kalten Gang“ durch eine Kaplan-Turbine zu ersetzen. Tatsächlich fanden die einschlägigen Kontaktaufnahmen und Vertragsverhandlungen noch knapp vor dem Ersten Weltkrieg statt.

Unbeirrt von den Kriegseinflüssen machte sich Kaplan eifrig an Studien und Versuche, um letztlich die ganze Anlage zu entwerfen. Mit der Ausführung der Maschinenteile wurde die stets loyal gewesene Stahlhütte Ignaz Storek betraut. Die Kriegswirren vereitelten aber die fristgerechte Lieferung, so dass die Auftraggeberseite schon die Stornierung ihrer Bestellung ins Auge fasste. Wieder schien die mühevoll entwickelte Turbinenarbeit gefährdet. Schließlich kam die Turbine nach Kriegsende im Januar 1919 aber doch noch an ihrem Bestimmungsort an und konnte in den folgenden Monaten eingebaut werden. Mitte Juni wurde die Wasserkraftanlage durch Fachleute auf ihre Tauglichkeit überprüft. Die Messergebnisse lagen über



den garantierten Werten. Hier erzeugte eine Turbine, deren Laufraddurchmesser 600 mm betrug, bei der hohen spezifischen Drehzahl von  $n_s = 800$  Umdrehungen pro Minute eine Leistung, die von der Fachwelt bis dahin als unmöglich erschien: 84 % Wirkungsgrad, der noch dazu auch bei halber Beaufschlagung nahezu konstant blieb – das war sensationell! Wenige Tage später sollte dieses Ergebnis vor den Augen des angesehenen Turbinenfachmannes Budau von der Technischen Hochschule in Wien nochmals bestätigt werden. Erst als Budau diese Leistungen unglaublich als Bluff abtun wollte, weihte Kaplan, seit 1918 selbst ordentlicher Professor, seinen Kollegen in sein Geheimnis ein: Diese Turbine arbeite eben mit verstellbaren Laufradschaufeln. Budau sprang daraufhin auf und rief: „Wahrlich der Mann hat Courage!“

Die erste Kaplan-Turbine der Welt hatte also ihre Bewährungsprobe bestanden – und was man damals noch nicht wissen konnte: sie würde weitere vierzig Jahre klaglos ihren Dienst versehen. Zu Recht landete sie schließlich als Renommierstück vor dem Technischen Museum in Wien (Bild 5).

## 7 Viel in Bewegung

Die Veröffentlichung der Bremsergebnisse der Turbine von Velm erregte große Aufmerksamkeit in der in- und ausländischen Fachwelt. Der Einführung von Kaplans Erfindung in die Praxis schien nun nichts mehr im Wege zu stehen, zumal es Kaplan fürs Erste auch gelungen war, seine Patente durchzusetzen. Das „Anti-Kaplan-Syndikat“ lenkte ein – man wollte sich das große Geschäft nicht entgehen lassen und die Energien der Flüsse und Ströme nunmehr einer wirtschaftlichen Verwertung zuführen. Zu Beginn der Vertragsverhandlungen mit dem „Kaplan-Konzern“, wie sich die Geläuterten nun selbst nannten, konnte es sich aber der Erfinder nicht versagen, die Firmenvertreter anzuklagen, dass ihre ständigen Angriffe ihn bis zur völligen physischen und finanziellen Erschöpfung getrieben hätten. Tatsächlich war der Preis für Kaplans Sieg, wie sich bald zeigen sollte, ein sehr hoher: der Verlust der Gesundheit.

Als nach dem Krieg die ersten namhafteren Beiträge aus Lizenzverträgen an Kaplan ausbezahlt



Bild 7a: Kaplan 1925/1926



Bild 7b: Kaplan (mit Schirmmütze) am Teich

wurden, wollte er sich einen langgehegten Wunsch erfüllen: ein Haus im Grünen. Ihn, der bisher mit seiner Familie in verschiedenen Mietwohnungen im Stadtgebiet von Brünn gewohnt hatte, zog es magisch aufs Land. So bat er seinen mittlerweile pensionierten Vater, etwas Geeignetes zu suchen. Dabei hatte er auch in diesem Zusammenhang recht klare Vorstellungen von dem, was er wollte:

ein Anwesen mit einer Landwirtschaft, einem Wasserlauf, der sich zur Stromgewinnung anbot, und einer Glasveranda. Tatsächlich wurde der alte Herr bald fündig: Ein großzügiger Landsitz in der Salzkammergutgemeinde Unterach, hoch über dem Tal zwischen Attersee und Mondsee gelegen, stand zum Verkauf. Obwohl sich das Anwesen damals in einem ziemlich erbärmlichen Zustand befand, verfiel die Familie Kaplan sofort dem ihm innewohnenden Zauber des Außergewöhnlichen (**Bild 6a**).

1920 wurde das idyllische Gut Rochuspoint gekauft. Es war geplant, dass Kaplans Vater und dessen zweite Frau Rosina ständig dort wohnen und die ins Auge gefassten Umbauten beaufsichtigen sollten, während der stolze neue Eigentümer mit seiner Familie nur in den Ferien das neue Heim nutzen wollte. Es kam jedoch anders ... (**Bild 6b**).

## 8 Schwere Schicksalsschläge

Im Frühjahr 1921 starb Carl Kaplan völlig unerwartet. Der Verlust seines Vaters traf den Erfinder sehr, war er doch ein ausgesprochener Familienschicksal, der sich besonders seinen Eltern verbunden gefühlt hatte. Noch im Alter schossen ihm Tränen in die Augen, wenn von ihnen die Rede war. Doch das Leben hatte kein Nachsehen mit dem erschöpften und trauernden Wissenschaftler. Unbarmherzig drang eine Katastrophenmeldung nach der anderen an sein Ohr. Bei den von der Stahlhütte Storek gebauten Turbinenanlagen mit mehr als 6 m Nutzhöhe traten explosionsartige Geräusche und Erschütterungen auf, die in schweren Fällen sogar den Betrieb unmöglich machten. Die Leistung der Turbinen verschlechterte sich drastisch und die stählernen Laufradschaufeln zeigten an der Unterseite starke Anfrassungen.

Niemand wusste Rat. Die Firma Storek musste einen erheblichen Teil ihres Vermögens opfern, um die den Kunden gegenüber eingegangenen Garantien einzulösen. Kaplan war über diesen Rückschlag verzweifelt und konnte sich diese Störungen vorerst nicht erklären. In Kenntnis um seinen angegriffenen Gesundheitszustand ließ sich der Erfinder ein halbes Jahr von seinen Hochschulverpflichtungen in Brünn entbinden, um sich auf Rochuspoint in dieser kritischen Phase einerseits auf die Probleme rund um seine Erfin-

dung konzentrieren zu können und um andererseits bei diesem Aufenthalt in der Natur wieder zu Kräften zu kommen.

Anfang Februar 1922 erkrankte Kaplan jedoch schwer. Die Anstrengungen und Aufregungen der letzten Jahre hatten laufend an seinem Gesundheitszustand genagt und führten nun zum völligen Zusammenbruch. Er fiel in tiefe Bewusstlosigkeit und war bewegungsunfähig. Die beigezogenen Ärzte trafen voneinander abweichende Diagnosen. Es war die Rede von einer Kopfgrippe, einem Nervenzusammenbruch oder einem Schlaganfall. Jedenfalls rang der erst Sechsvierzigjährige mit dem Tod. Seine Frau wich buchstäblich für Wochen nicht vom Krankenlager ihres Mannes und pflegte ihn fürsorglich. Doch wer nahm sich der ausnehmend brisanten Angelegenheiten rund um seine Erfindung an? Das Lebenswerk trieb bedrohlich auf einen Abgrund zu.

In dieser schwierigen Situation lagen die Hoffnungen nun bei Kaplans Hochschulassistenten Dipl.-Ing. Jaroslav Slavik. Dieser erinnerte sich: „Als ich die Akten auf dem Schreibtisch Professor Kaplans zu sichten begann, wurde mir enge ums Herz. Es wimmelte dort von Bescheiden der Patentämter, von Einsprüchen, Fälligkeitserinnerungen und sonstigen Schriften, zu deren Erledigung teils verlängerbare, teils nicht verlängerbare Fristen gestellt waren ... Ich stürzte mich in die Arbeit, um zu retten, was noch zu retten war.“ [13].

Doch die größte Hiobsbotschaft sollte erst eintreffen: Am letzten Tag der fünfjährigen Präklusivfrist – nach Ablauf einer solchen, kann gegen ein Patent kein Einspruch mehr geltend gemacht werden – wurden in Deutschland zwei Nichtigkeitsklagen gegen einen entscheidenden Teil der Erfindung eingebracht. Die Zeichen standen auf Sturm. An ein persönliches Erscheinen Kaplans bei der in Berlin stattfindenden gerichtlichen Auseinandersetzung war aufgrund seines angegriffenen Gesundheitszustands nicht zu denken. So musste Jaroslav Slavik die aufwendigen Vorbereitungen für diese schwierige Verhandlung treffen und schließlich an der Seite eines Berliner Patentanwalts die Position Kaplans vor Gericht vertreten. Beide Klagen wurden vom Gericht abgewiesen und so konnte Kaplans tüchtiger Mitarbeiter glückstrahlend „Gewonnen!“ nach Unterach telegrafieren.

Auch andere Patentstreitigkeiten wurden zu Gunsten des auch noch Monate nach seinem Zu-

sammenbruch an sein Bett gefesselten Erfinders entschieden. Zudem schien es, dass man im Turbinenversuchslaboratorium bei Storek in Brünn der Ursache des Versagens mancher Turbinenanlagen einen Schritt näher kam. Diese guten Nachrichten beförderten sichtlich Kaplans Genesung, so dass allmählich sogar daran zu denken war, ärztlich empfohlene Kuraufenthalte zu absolvieren. Endlich, nach längerer Abwesenheit von seiner Lehrkanzel, konnte Kaplan im Herbst 1922 seine Arbeit an der DTH in Brünn wieder aufnehmen. Doch er war ein Anderer geworden: das Feuer in seinen dunklen Augen schien erloschen. Kaplan musste hinkünftig mit seinen Kräften haushalten.

## 9 Ende des Kampfes

In Brünn ging Kaplan, unterstützt von seinen Assistenten, gemeinsam mit der Firma Storek in zahlreichen Versuchsreihen dem unerklärlichen Versagen mancher Turbinenanlagen nach. Nach langem, fieberhaftem Experimentieren erkannte der Erfinder, dass die Verschlechterung der Leistung mancher der Wasserkraftwerke mit Kaplan-Turbinen auf Hohlraumbildungen, auch Kavitation genannt, zurückzuführen war. Wird der Wasserdruck an der Saugseite des Laufrades sehr klein, so wird die im Wasser gelöste Luft ausgeschieden und das Wasser in Schaufelnähe verdampft. Bei auch nur geringem Ansteigen des Drucks, stürzen die Dampfblasen infolge Kondensation schlagartig zusammen. Waren diese Kavitationserscheinungen bei Kaplans kleinen Versuchsturbinen in Form von scheinbar unbedeutenden Bläschen schwer sichtbar, so stellten sie sich bei großen Betriebsturbinen als Ursache für schwere Schäden an Turbine und Fundament heraus. In mehrmonatiger Arbeit konnten die Gesetzmäßigkeiten der Hohlraumbildung erforscht und von Kaplan Laufräder konstruiert werden, die kavitationsfrei arbeiten, wenn sie richtig eingebaut waren, das heißt näher zum Unterwasser gesetzt wurden, um so den Unterdruck auf der Saugseite der Turbine zu verringern. Aufgrund dieser für den Turbinenbau neuen Erkenntnisse konnte die Stahlhütte Storek einen Großteil der schlecht arbeitenden Anlagen umbauen und schon bald eine Kaplan-Turbine mit

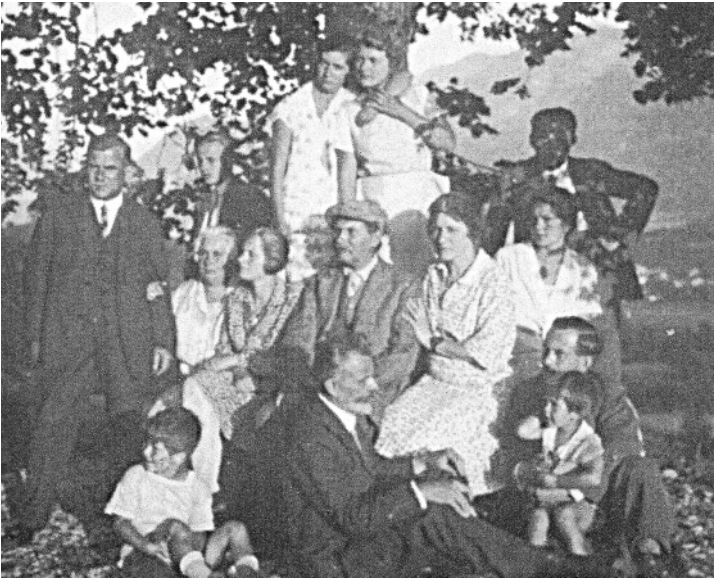
17 m Fallhöhe in Betrieb nehmen, die hydraulisch einwandfrei arbeitete.

Rückschauend kommentierte Kaplan die schwierige Zeit der „Kinderkrankheiten“ – so seine eigene Wortwahl – seiner Erfindung wie folgt: „Die Natur enthüllt den Schleier ihrer Geheimnisse nur widerwillig und der Weg zum ersehnten Ziele ist mit Entbehrungen und zerstörten Hoffnungen hinreichend gekennzeichnet. Von diesen Schwierigkeiten weiß der „glückliche“ Nacherfinder nichts, da ihm der Weg zum Ziele vorbereitet wurde. Heute, wo ich den Werdegang meiner Turbinen überblicke, wundere ich mich, dass mir so spät der rettende Gedanke der Hohlraumbildung einfiel.“ [5].

In der Genesis der Kaplan-Turbine war das Beherrschen des Kavitationsphänomens leider wieder nur ein wichtiger Etappensieg, denn noch gab es keinen erlösenden Schlussstrich unter die langwierigen Auseinandersetzungen um die Patente. Haupthindernis auf dem Weg zu einer Streitbeilegung war der Umstand, dass die Parteien, deren Nichtigkeitsbeschwerde 1922 in Berlin abgewiesen worden war, Berufung gegen das Urteil einlegten und damit die Patentangelegenheit bis zum Reichsgericht in Leipzig als letzter Instanz trieben. Vom Ausgang dieses Prozesses hing also viel ab. In Kenntnis der Bedeutung der Sache schloss sich der „Kaplankonzern“ als Nebenintervenient an der Seite des Erfinders an.

Verständlicherweise brach man 1925 mit gemischten Gefühlen zur Verhandlung nach Leipzig auf, wenngleich in der Gewissheit, sich sorgfältig auf die Entkräftung der gegnerischen Einwände vorbereitet zu haben. Obwohl damit zu rechnen war, dass diese gerichtliche Auseinandersetzung eine Strapaze sein würde, die die noch immer labile gesundheitliche Verfassung des Erfinders bis aufs Äußerste belasten würde, ließ es sich Kaplan nicht nehmen, neben seiner Frau, Slavik und diversen Firmenvertretern und Patentanwälten persönlich an der Verhandlung teilzunehmen.

Durch die jahrelang empfangenen Kränkungen und Demütigungen war Kaplan stark emotionalisiert, und so kam es, wie es kommen musste. Slavik berichtete: „In der Hitze des Gefechtes beachtete der Herr Professor meine warnenden Einflüsterungen überhaupt nicht mehr und ich sah unabwehrbar den Augenblick herannahen, wo er sich in Widersprüche verwickeln würde, die den Geg-



**Bild 7c:** Viktor Kaplan im Kreise der Familie und Freunden

nern nur willkommen gewesen wären. In meiner Not zog ich kräftig an seinem Rockschoß. Indigniert über diese Störung wandte sich mir der Herr Professor zu und frug mich, was ich denn eigentlich wolle. Ehe ich ihm dies erklären konnte, hatte jedoch der Vorsitzende des Senats bereits einem anderen Redner das Wort erteilt. Der Herr Professor sah mich mit einem erbosten Blick an, dass ich seine Verteidigungsrede unterbrochen hatte ... Der gleiche Fall wiederholte sich noch einmal und da war der Herr Professor auf mich schon ernstlich böse.“ [13].

Der Ärger war aber bald wieder verraucht, als sich im Laufe der Verhandlung das Blatt immer mehr zu Gunsten des Angeklagten wandte. Der Prozess endete schließlich mit einem Sieg Kaplans. Rückschauend kommentierte der Erfinder dieses wichtige Urteil: „Trotz des amtlichen Charakters des Deutschen Reichspatentamtes hatte dasselbe doch ein menschliches Einsehen. Es ließ einen Erfinder, der sich wie ein Löwe um sein geistiges Eigentum wehrte, nicht im Stich. Die Einsprüche wurden im Beschwerdeverfahren kostenpflichtig abgewiesen und mir das Patent in vollem Umfange erteilt.“ [5] (**Bild 7a**).

Kaplan war Slavik zeitlebens dafür dankbar, dass er ihm in Zeiten größter Bedrängnis umsichtig und sachlich versiert zur Seite gestanden hatte. Ideell entlohnte er seinen treuen Mitarbeiter mit

dem Gold aufrichtiger Freundschaft, materiell mit der Überlassung eines Anteils an dem Ertrag seiner Patente.

Durch das Urteil des Reichsgerichtes in Leipzig blieben die Patente Kaplans in allen wichtigen Punkten aufrecht. Insgesamt wurden Kaplan 280 Patente in weltweit 27 Staaten erteilt. Mit dem Gerichtsentscheid endete ein zwölf Jahre dauernder Rechtsstreit, dessen destruktive Kraft sich erahnen lässt, wenn man weiß, dass allein die amtlichen Unterlagen dazu 14 500 Seiten umfassen. Endlich war die Erfindung der Kaplan-Turbine auch rechtlich abgesichert, deren Vorteile ihr Schöpfer selbst wie folgt zusammenfasste [5]:

- „1. Hohe spezifische Drehzahl bis über  $n_s = 800$ .
2. Guter Wirkungsgrad.
3. Große Unempfindlichkeit gegen Drehzahl- bzw. Gefällsschwankungen. Dieser Umstand ist bei Hochwassergefahr wertvoll.
4. Große Unempfindlichkeit gegen Verunreinigungen des Wassers durch Sand, Schlamm, Laub, Äste usw.
5. Leichte Herstellbarkeit, gute Transportmöglichkeit.“



## 10 Die Zeit der Anerkennung

1926 feierte Kaplan seinen 50. Geburtstag und man zollte dem Jubilar in zahlreichen Zeitschriften fachliche Anerkennung. Neben anderen Auszeichnungen konnte er sich über die Verleihung seines ersten Ehrendoktorats freuen, das er von der DTH in Prag erhielt. Acht Jahre später wurde Kaplan zum „Doktor h. c.“ der DTH Brunn ernannt. Größte Genugtuung war dem Erfinder aber sicher, als 1926 die erste Großturbine klaglos ihren Betrieb aufnahm. Die in Lilla Edet in Schweden installierte Kaplan-Turbine mit einem Laufraddurchmesser von 5,8 m erbrachte eine Leistung von 11 200 PS bei einem Schluckvermögen von 160 m<sup>3</sup>/s, bei einem Gefälle von 6,5 m.

Aus heutiger Sicht ist die Bestückung der Kraftwerksanlage Lilla Edet mit einer Kaplan-Turbine der Beginn einer ausgesprochenen Erfolgsstory gewesen, hat sich doch in der Folge dieser Wasserkraftmaschinentyp bei niedrigen bis mittleren Gefällen zwischen 2 m und 60 m weltweit durchgesetzt. Alle großen Laufkraftwerke an Flüssen und Strömen rund um den Erdball, aber auch Gezeitenkraftwerke arbeiten heute mit Kaplan-Turbinen. Die größten davon erreichen Leistungen von 170 000 PS oder 125 MW bei einem Wirkungsgrad von maximal 95 %, der sich auch bei Teillast nur wenig verringert. Noch war es jedoch nicht soweit ...

Mitte der 1920er Jahre begann Kaplan gemeinsam mit seinem Freund Alfred Lechner, Professor für Mechanik an der Technischen Hochschule Wien, mit der Überarbeitung seines Buches „Bau rationeller Francisturbinenlaufräder“, das er seinerzeit als Doktorarbeit eingereicht hatte. Es sollte 1931 als letzte Veröffentlichung Kaplans unter der Ko-Autorenschaft Lechners mit dem Titel „Theorie und Bau von Turbinenschnellläufern“ erscheinen.

Sonst wandte sich der Erfinder in seinen Schriften immer mehr von den fachlichen Problemen im engeren Sinne ab und wurde zum Mahner gegenüber jenen, in deren Händen sich die technische Macht konzentriert. So schrieb er etwa: „[Der Erfindungsgeist] schuf uns die Werkzeuge und jene Mittel, die uns das Leben angenehmer gestalten sollen. Aber – und dies darf nicht verschwiegen werden – auch Kummer und Leid kann dieser Fortschritt verursachen, wenn wir die technischen



**Bild 7d:** Viktor Kaplan (links) mit Freund Alfred Lechner

Errungenschaften in machtgierige Hände legen. Vor der Entwicklung einer solchen Kultur sei dringend gewarnt. So haben unseren Weltkrieg nur Werkzeuge einer skrupellosen Macht trotz aller Begeisterung und Vaterlandsliebe entschieden. Von dieser Seite aus gesehen erscheint uns die technische Macht als Beherrscherin des Menschengeschlechts, welche schließlich zur Vernichtung desselben führen kann.“ [8].

1930 empfing Kaplan neben anderen Auszeichnungen auch die Ehrenbürgerschaft seiner Wahlheimat Unterach. Dies freute den Wissenschaftler umso mehr, als er sich im Kreise dieser meist einfachen Leute immer zu Hause gefühlt hatte. Später sollten ihn die Unteracher auch noch mit der Bitte überraschen, doch ihr Bürgermeister zu werden – einem Anliegen, dem der verdutzte, weil unpolitische „Herr Professor“ trotz aller Verbundenheit jedoch nicht entsprechen wollte.



## 11 Leben auf Rochuspoint

Kaplan hatte in den Jahren nach seiner schweren Erkrankung nie wieder seine ursprünglich vitale und starke Konstitution zurückgewonnen. Durch die Erlöse aus den Lizenzverträgen zu beachtlichem materiellen Wohlstand gelangt, wollte er sich nach den vielen Anstrengungen und zermürbenden Kämpfen ins Privatleben zurückziehen – Privatleben konnte bei ihm aber nur heißen, sich endgültig seinem geliebten Landgut Rochuspoint, hoch über dem Attersee gelegen, zu widmen und sich dort im Kreise seiner Familie aufzuhalten. Der Zeitpunkt schien günstig, nachdem nun auch seine jüngere Tochter Gertraud ihre Schule in Brünn mit Matura abgeschlossen hatte. Kaplan entschloss sich deshalb 1931, um seine Frühpensionierung anzusuchen, worauf die Familie den Haushalt in Brünn auflöste und endgültig ins Salzkammergut zog (**Bild 7b**).

Ein hervorstechender Charakterzug Kaplans war sein Streben nach Unabhängigkeit. Diese Eigenschaft diktierte auch die Entwicklung, die sein weitläufiges Landgut unter seiner Führung nehmen sollte. Kaplan betrieb nun Viehwirtschaft, legte ausgedehnte Gemüse- sowie Obstbaumkulturen an und unterhielt eine Imkerei. Dem nicht genug, er ließ auch ein großes Glashaus, eine Schlosserei und eine Tischlerei bauen und hatte eigene Schmelzöfen in Betrieb. Selbstverständlich sorgte der Herr des Besitzes auch für eine hauseigene Stromerzeugung aus einer Wasserkraftanlage, die mit einem Peltonrad bestückt wurde. Der für die rege Bautätigkeit erforderliche Sand wurde mittels Schotterbrechern dem vorbeifließenden Bach abgerungen. Doch im Mikrokosmos Rochuspoint durfte auch eine entsprechende Infrastruktur für Freizeitvergnügungen nicht fehlen, wie ein Tennisplatz, ein Badeteich und – für damalige Verhältnisse eine Sensation – ein eigener Kinosaal. Aufgrund der zahlreichen Holzbaracken sprachen Freunde spöttelnd von „Hütteldorf“.

Das größte Glück des „Herrn Professors“ schien, wenn rund um ihn fleißig gearbeitet wurde. Bald waren über zehn Leute beruflich ständig auf Rochuspoint beschäftigt und es gab viel Besuch, der teilweise auch tatkräftig zupacken musste, um die oft spontan geborenen Ideen des Hausherrn sofort zu verwirklichen. Mit einem Wort,

auf Rochuspoint herrschte immer große Betriebsamkeit – aber es gab trotz der vielen Arbeit auch immer eine Gaudi (**Bild 7c**).

Es lag förmlich auf der Hand, dass dieses rege Treiben in entspannter Atmosphäre die Menschen einander näherbrachte, und so wurde Rochuspoint auch der ideale Nährboden für diverse „Heiratssachen“. Hier fanden etwa die Köchin und der Chauffeur zusammen, der Assistent und die Lehrerin der Töchter, aber auch Kaplans ältere Tochter Grete traf hier erstmals ihren späteren Mann, den Doktor der Technik Edwin Kramberger. Er war Hochschulassistent bei Lechner (**Bild 7d**) und als Maschinenbauingenieur der ideale Schwiegersohn für Kaplan. Mit ihm konnte er Fachsimpeln und Experimentieren. 1931 wurde geheiratet.

In seinen persönlichen Bedürfnissen blieb Kaplan immer ausnehmend bescheiden. Er leistete sich nur eine teure Extravaganz, nämlich eine Luxuslimousine, deren Kühlerhaube eine kleine Turbine zierte. Mit ihr wurden gelegentlich Ausflugsfahrten und Reisen unternommen, wobei sich Kaplan immer chauffieren lassen musste, da er sich nie dazu durchringen konnte, den Führerschein zu machen.

War Kaplan selbst in allen seinen Überlegungen, seinen Landsitz betreffend, von Zweckmäßigkeit geleitet, lagen ergänzend und manchmal auch dazu kontrastierend seiner Frau die ästhetischen Reize von Rochuspoint am Herzen. Sie richtete die Villa geschmackvoll ein, ließ rund ums Haus ein raffiniertes Netz von Sitzplätzen und Kieswegen anlegen und sorgte für den entsprechenden Blumenschmuck in ausgedehnten Beetanlagen. Zudem führte sie mit Geschick und Umsicht die Hausangestellten und war eine großzügige sowie perfekte Gastgeberin. Der Hang seiner Frau zur inszenierten Ästhetik war dem Erfinder allerdings immer wieder Anlass für Spötteleien und manchmal auch für ziemlich derbe Scherze. So wurde beispielsweise Franzl Mittermaier, der Chauffeur, von Frau Kaplan bei größeren Einladungen, mit schwarzem Anzug und weißen Handschuhen angetan, als Butler eingesetzt – was Kaplan bloß den Kommentar abrang: „Na Franzl, machen's wieder einen Kasperl aus Ihnen?!“ Oder einmal, als es wieder besonders gediegen zugehen sollte, begann der Hausherr dem Dienstmädchen das teure Geschirr zuzuwerfen. Seine Gäste zwang

er, das Gleiche zu tun. Damit war natürlich zum Leidwesen seiner Frau die Eleganz des Abends vernichtet. Für Besucher, die ihm gegen den Strich gingen, weil sie besonders „vornehm“ taten, hatte Kaplan einen speziellen Streich auf Lager: Er legte dem „Opfer“, vom Tischtuch verdeckt, einen Balg unter den Teller, den er, nachdem die Suppe aufgetragen war, heimlich aufpumpte, so dass der Inhalt unweigerlich über den Tellerrand auf das Tischtuch schwappte. Dazu wiederholte er stereotyp: „Ich kann keine Menschen leiden, die beim Essen patzen!“ Es ist verständlich, dass sich in solchen Fällen seine Frau stets schützend vor den verspoteteten Gast stellte und ihren Mann in die Schranken wies.

Natürlich waren auch die engsten Freunde willkommene Zielscheiben für Kaplans skurrilen Humor. Als sein engster Freund und nachmaliger Biograph Alfred Lechner zum Ordinarius für Mechanik an der Technischen Hochschule Wien ernannt wurde und sich kurz darauf zu einem Besuch auf Rochuspoint angesagt hatte, dachte sich Kaplan etwas Besonderes aus: Er organisierte die Unteracher Musikkapelle sowie die Goldhaubenfrauen, die Böllerschützen und den Bürgermeister – alles unter dem Vorwand, dass er einen Regenten erwarte, den er nach Rochuspoint eingeladen habe. Der prominente Besucher reise inkognito und käme per Schiff. Dieses Gerücht verbreitete sich wie ein Lauffeuer und bald war der ganze Ort auf den Beinen, um Zeuge des Empfanges für den hohen Gast zu werden. Wo doch die Vorbereitungen schon unübersehbar auf Hochtouren liefen! Endlich war es soweit: Der Dampfer legte am Landungssteg an, es wurden Böllerschüsse gefeuert, die Musikkapelle spielte mit einem Marsch auf und der Bürgermeister, von Ehrenjungfrauen umringt, eilte auf einen äußerst bescheiden gekleideten Herrn mit einem abgegriffenen Kofferchen in der einen und einen Regenschirm in der anderen Hand zu, der verlegen über so viel Aufhebens an Land ging. Erst als ihn der Bürgermeister mit „Majestät“ anredete und umständlich freundliche Worte der Begrüßung fand, dämmerte Lechner, dass hier ein Streich inszeniert worden war. Und tatsächlich, schon nahm er Kaplan mitten in der wartenden Menge wahr, der ihm vergnügt zuwinkerte. – Die Unteracher wurden mit Würstel und Kracherl dafür entschädigt, dass sie ihren Ehrenbürger auf den Leim gegangen waren, und die

Ortschronik der Salzkammergutgemeinde ist seitdem um eine Anekdote reicher.

Entspannung fand Kaplan auf ausgedehnten Spaziergängen, beim Schachspiel, bei Fachsimpeleien und beim Experimentieren. Im Alter wandte er sich etwa noch dem Problem der Verbesserung von Schiffsschrauben zu. Außerdem beschäftigte er sich mit der Entwicklung von Lötkolben, die im Unternehmen seines Schwiegersohns noch Jahrzehnte später produziert werden sollten. Viel Zeit widmete der Professor seinen Tieren: Er zähmte beispielsweise ein Reh und eine Krähe und von einer Reise brachte er zwei Kapuzineräffchen mit, die tagsüber sogar ins Freie durften und abends mit Bananen in ihren Käfig zurückgelockt wurden.

Alles in allem verfügte Kaplan im Alter über ein mildes, abgeklärtes Naturell. Er bezog seine Zufriedenheit aus der Gewissheit, mit seiner Erfindung etwas geleistet zu haben, das mittlerweile Weltgeltung erlangt hatte und auch in reichem Maße materielle Früchte abwarf.

## 12 Abschied von dieser Welt

Im Sommer 1934 machten Kaplan und seine Frau einen ihrer vielen Abendspaziergänge. Der Weg führte sie – wie so oft – auf ein Plateau einer steil nach Süden abfallenden Wiese ihres Landsitzes.



**Bild 8:** Ruhestätte Kaplans

Kaplan blieb stehen und sagte: „Siehst, Greterl, hier möchte ich einmal begraben werden.“ Beide ahnten wohl nicht, dass der Tod schon wartete ...

Im Juli feierte der Hochschulprofessor mit seiner Frau und seiner Familie Silberne Hochzeit. Margarethe war damals 50, seine Töchter waren 24 Jahre und 21 Jahre alt. Kaplan konnte auf sein „Drei-Mäderl-Haus“ sehr stolz sein, waren doch alle drei Damen lebensstüchtige und attraktive Erscheinungen. Während die ältere Tochter Grete zu dieser Zeit schon in Mondsee verheiratet war und zwei ihrer insgesamt sieben Kinder hatte, studierte die jüngere Gertraud an der Universität Wien Germanistik und Romanistik. Sie sollte erst nach ihrer Promotion vier Jahre später heiraten und insgesamt sechs Kinder auf Rochuspoint großziehen.

Letztlich kam das Ableben des weltberühmten Professors wie der sprichwörtliche Blitz aus heiterem Himmel. Kaplan verschied in der Nacht des 23. August 1934 im 58. Lebensjahr in den Armen seiner Frau an einem Gehirnschlag. Der Totenkampf dauerte nur wenige Stunden. Unter größter Anteilnahme der Öffentlichkeit wurde er am Ortsfriedhof in Unterach beigesetzt. An der von ihm gewünschten Stelle ließ seine Frau ein Mausoleum bauen, in das die sterblichen Überreste ein Jahr später umgebettet wurden (**Bild 8**). So fand eine der größten österreichischen Erfinderpersönlichkeiten seine letzte Ruhe inmitten der freien Natur auf seinem geliebten Landsitz. Die dort herrschende Stille wird auch heute nur durch das Rauschen eines nahen Baches und gelegentliches Kinderlachen, das von Rochuspoint herüberdringt, unterbrochen. PANTA RHEI – Alles fließt ...

#### Autoren

##### **o. Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. Gerlind Weber**

Müllnergasse 13/17

1090 Wien

Österreich

profgerlindweber@gmail.com

##### **Dipl.-Ing. Dr. Gunter Weber**

Prof.-Angermair-Ring 14

85748 Garching

gunter.weber@gmx.de

#### Literatur

- [1] Gschwandtner, M.: Aurum ex aquis. Viktor Kaplan und die Entwicklung zur schnellen Wasserturbine. Dissertation im Fachbereich Geschichts- und Politikwissenschaft der Universität Salzburg. Bände I und II, Salzburg, 2006.
- [2] Kaplan, V.: Eine neue Wasserturbine. In: Zeitschrift für die gesamte Wasserwirtschaft (1917), Heft 22, S. 169 ff.
- [3] Kaplan, V.: Über schwarze und weiße Kohle. In: Zeitschrift für das gesamte Turbinenwesen (1918), Heft 32, S. 271 ff.
- [4] Kaplan, V.: Kaplanturbine oder Francisturbine? In: Zeitschrift für das gesamte Turbinenwesen (1919), Heft 32, S. 345 ff.
- [5] Kaplan, V.: Wie die Kaplanturbine entstand. In: Wasserkraft-Jahrbuch 1925/26. S. 296 ff.
- [6] Kaplan, V.: Die Entwicklung des Kaplanlaufrades. In: Wasserkraft-Jahrbuch 1927/28, S. 414 ff.
- [7] Kaplan, V.: Kavitationserscheinungen bei Turbinen mit großer Umlaufgeschwindigkeit. In: Wasserkraft-Jahrbuch 1927/28, S. 414 ff.
- [8] Kaplan, V.: Die technische Macht. In: Technik für Alle (1929), S. 2 ff.
- [9] Lechner, A.: Viktor Kaplan. Sonderausgabe aus Blätter für Geschichte der Technik, Julius Springer, Wien 1936.
- [10] Marek, G.: Viktor Kaplan 1876-1934. Wien: Eigenverlag des Technischen Museums Wien, 1976.
- [11] Oberösterreichische Kraftwerke AG (Hrsg.): Viktor Kaplan – Energie aus Wasser, Linz: o. J.
- [12] Schulz, F.: Viktor Kaplan als Forscher. In: Blätter für Technikgeschichte (1974/75), Heft 36/37, S. 105 ff.
- [13] Slavik, J.: An der Wiege der Kaplanturbine. In: Blätter für Technikgeschichte (1968), Nr. 29.
- [14] Weber-Kaplan, G.: Biographie meines Vaters. Unveröffentlichtes Manuskript, 1981.

Gerlind Weber and Gunter Weber

### **Viktor Kaplan – Ups and Downs of an Inventor’s Life**

„Nature refuses to reveal easily the curtain of its secrets and the way to the targets of an inventor is paved with privations and destroyed hopes.“ With these words Viktor Kaplan summed up in 1925 the development of the turbine invented by him. Two of his grandchildren took the opportunity of the jubilee „Hundred Years Kaplan Turbine“ to illustrate the ups and downs of this great Austrian inventor’s life.

Герлинд Вебер и Гунтер Вебер

### **Виктор Каплан – взлеты и падения в жизни изобретателя**

«Природа приоткрывает завесу своих тайн очень неохотно, путь к достижению желаемой цели отмечен множеством лишений и разрушенных надежд». Этими словами австрийский изобретатель Виктор Каплан в 1925 году ретроспективно отметил сложность работы над созданием турбины, названной его именем. Двое его внуков используют юбилей «100 лет турбины Каплана» для того, чтобы рассказать о взлетах и падениях в жизни великого изобретателя и его личности.

Christian Bauer und Stefan Gössinger

# Die Entwicklung der Kaplan-Turbine

Die Kaplan-Turbine wurde zu Beginn des 20. Jahrhunderts entwickelt und stellt neben Pelton- und Francis-Turbinen die dritte der heutzutage genutzten Hauptturbinenbauarten dar. Die damalige Fachwelt war besonders stark von dem Ziel getrieben, bestehende Wasserturbinen hinsichtlich ihrer Schnellläufigkeit zu verbessern. Die unternommenen Forschungsanstrengungen an Francis-Laufrädern konnten diesem Ziel jedoch nicht gerecht werden. Dies erkannte auch Viktor Kaplan und entwickelte aus seinen Erkenntnissen schlussendlich die nach ihm benannte Kaplan-Turbine.

## 1 Der Erfinder Viktor Kaplan

„Es war gerade wieder eine strenge Untersuchung an meiner Wasserturbine und in meine Arbeit ganz vertieft, vergaß ich, dass heute Vorlesung sei.“ Viktor Kaplan in einer von ihm gehaltenen Vorlesung, zu der er zu spät gekommen war [2].

Viktor Kaplan, ein herausragender Erfinder seiner Zeit, entwickelte in verhältnismäßig kurzer Dauer die heute weltweit verbreitete Kaplan-Turbine. Mit seiner Erfindung konnte die Wasserkraftnutzung von Flüssen bei geringem Gefälle und großem Durchfluss wirtschaftlich rentabel gemacht werden. Bevor jedoch im Detail auf diese Entwicklung und ihre technischen Entstehungsschritte eingegangen wird, sollen private sowie berufliche Ereignisse im Leben Viktor Kaplans aufgezeigt werden, die den Grundstein für seine Erfindung legten. Die Meilensteine sowie seine persönlichen Schicksalsschläge sind mittels Zeitstrahl in **Bild 1** übersichtlich dargestellt.

Viktor Kaplan wurde 1876 in Mürzzuschlag, Steiermark, geboren. Bereits in seiner Schulzeit zeigte sich sein überaus hohes praktisches Potenzial sowie sein Erfindergeist. Beispielsweise ist der Bau einer Elektrisiermaschine, Dampfmaschine oder eines selbstgebauten fotografischen Apparates überliefert [2]. Diese praktischen Fähigkeiten sollten später bei der Entwicklung der Kaplan-Turbine eine wichtige Rolle spielen.

Nach der erfolgreich abgeschlossenen Schulzeit absolvierte Viktor Kaplan sein Maschinenbaustudium an der Technischen Hochschule (TH) Wien, welches er im Jahre 1900 beendete. Nach einem

freiwilligen Jahr bei der k. u. k. Kriegsmarine trat er im Oktober 1901 bei der Leobersdorfer Maschinenfabrik als Ingenieur ein. Zu Beginn seiner Tätigkeiten befasste er sich mit Themen im Bereich der Verbrennungskraftmotoren. Eine rein theoretisch verfasste Arbeit wurde von ihm an der TH Wien zur Dissertation eingereicht, jedoch mit dem Vermerk zur Ergänzung von praktischen Versuchen zurückgestellt. Ihm wurde dadurch schließlich klar, dass theoretische Untersuchungen alleine nicht ausreichen würden, um in der Technik bahnbrechende Entwicklungen umsetzen zu können. Bei der Entstehung der Kaplan-Turbine sollte er den experimentellen Weg später nie verlassen [2].

Unzufrieden mit seiner Situation in Leobersdorf versuchte Viktor Kaplan eine neue Anstellung zu finden und konnte diese 1903 als Konstrukteur an der TH Brunn finden. Diese Zeit bezeichnet die Anfänge Viktor Kaplans intensiver Forschungstätigkeiten auf dem Gebiet der Wasserkraftmaschinen. Vor allem Arbeiten über Konstruktionen von Francis-Turbinenschaufeln seien hierbei als Beispiel herausgegriffen [3], [4]. Ein gesammeltes Werk über seine Forschungstätigkeiten auf dem Gebiet der Francis-Laufräder reichte Kaplan an der TH Wien als Dissertation ein [9] und konnte im Frühjahr 1909 seine Promotion erfolgreich ablegen. Noch im gleichen Jahr erfolgte seine Habilitation an der TH Brunn.

Von da an trat ein Stillstand der bisher zahlreichen Publikationstätigkeiten ein. Der Grund dafür war die Errichtung eines Labors für Wasserturbinen an der TH Brunn, die Viktor Kap-



lans volle Aufmerksamkeit benötigte [2]. Er war maßgeblich an der Errichtung sowie Auslegung dieses Labors beteiligt, welches 1910 fertiggestellt wurde. Später gibt Kaplan an, dass dieses von ihm konzipierte Labor wesentlich zur Erfolgsgeschichte der Kaplan-Turbine beitragen konnte [5].

Abgesichert durch seine Anstellung als Professor in Brünn konnte er sich fortan vollends seinen Forschungen widmen. Der Grundstein in seinem Leben sowie die Voraussetzungen zur Entwicklung der Kaplan-Turbine waren somit gelegt. Der Antrieb seiner Forschungstätigkeiten resultierte unter anderem aus der Notwendigkeit einer erhöhten Schnellläufigkeit von Wasserkraftturbinen. Dies war in der damaligen Zeit, Anfang des 20. Jahrhunderts, von erhöhtem Forschungsinteresse.

## 2 Die Erhöhung der spezifischen Drehzahl

„Vor ungefähr 25 Jahren ... kam man mit der spezifischen Drehzahl ( $n_s$ ) nicht viel über 200 hinaus. Es waren daher kostspielige und teure Übersetzungsgetriebe vorgesehen, die den Nachteil hatten, störende Geräusche und Erschütterungen zu verursachen.“ (Viktor Kaplan [5]).

Um die Jahrhundertwende waren auf dem Gebiet der Wasserkraft zahlreiche Bestrebungen und Forschungsanstrengungen im Gange, die

Drehzahl von Turbinen zu erhöhen. Durch die aufstrebende Elektrizitätswirtschaft wurden ständig neue Ansprüche hinsichtlich Wirkungsgrad und Schnellläufigkeit gesetzt. Einen wesentlichen Beitrag dazu leistete 1891 die elektrotechnische Ausstellung in Frankfurt am Main. Es gelang Oskar von Miller den in Lauffen am Neckar erzeugten Drehstrom mit einer Spannung von 15 000 Volt durch eine 175 km lange Freileitung nach Frankfurt am Main zu übertragen. Somit war gezeigt, dass der Ort des Energieeinsatzes unabhängig von der Lage des Wasserkraftwerkes geworden war. Da Drehstromgeneratoren nach Gl. (2) bestimmte Drehzahlen benötigen, mussten zu deren Erreichung Übersetzungsgetriebe verwendet werden. Diese waren teuer, wartungsintensiv und setzten aufgrund ihrer Verluste den Gesamtwirkungsgrad der Anlage herab [1], [2].

Um die Notwendigkeit einer erhöhten Drehzahl der Turbinen deutlich zu machen, sollen folgende Formeln zur Illustration dienen. Aus Gl. (1) ist erkennbar, dass eine bestimmte Leistung entweder durch ein großes Moment  $M$  oder eine hohe Winkelgeschwindigkeit  $\omega$  erreicht werden kann:

$$P = M \cdot \omega \quad (1)$$

Wird eine bestimmte Leistung durch eine erhöhte Winkelgeschwindigkeit erreicht, sinkt das Drehmoment und somit auch die Abmessungen des

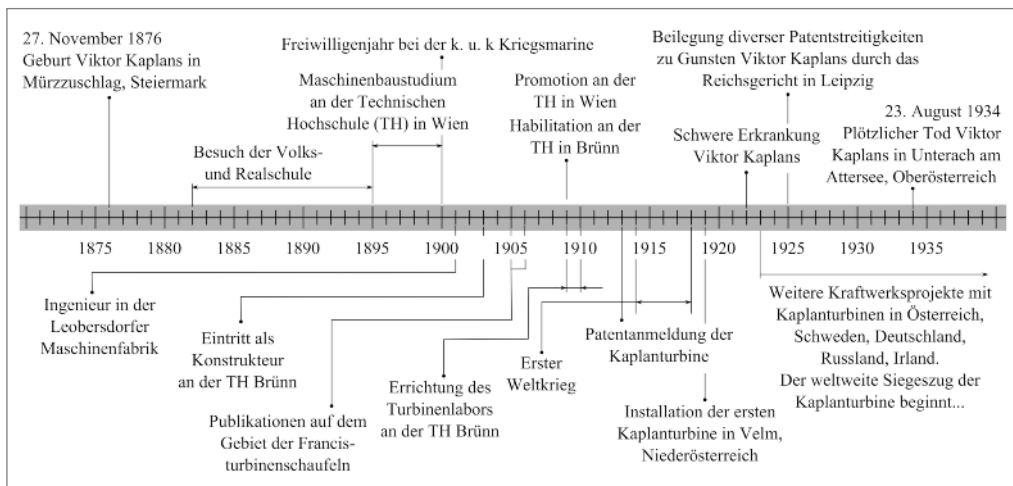


Bild 1: Auszüge wichtiger privater sowie beruflicher Ereignisse im Leben Viktor Kaplans [1], [2]

Generators, womit durch schnelllaufende Generatoren die Kosten der Wasserkraftanlage gesenkt werden können [2].

Synchrondrehzahlen von Drehstromgeneratoren werden nach Gl. (2) berechnet. Diese sind von Frequenz  $f$  und Polpaarzahl  $p$  abhängig. Somit ergibt sich beispielsweise bei einer Frequenz von 50 Hz für zweipolige Maschinen eine synchrone Drehzahl von 3 000 U/min bzw. bei vierpoligen Maschinen 1 500 U/min:

$$n = \frac{f \cdot 60}{p} \quad (2)$$

Im Weiteren kann aus Gl. (3) ohne Berücksichtigung von Verlusten abgeleitet werden, dass bei der Wasserkraftnutzung bei niedrigen Fallhöhen  $H$  die Strömungsgeschwindigkeit  $c$  des Wassers und somit auch die Umfangsgeschwindigkeit des Laufrades klein ist:

$$c = \sqrt{2 \cdot g \cdot H} \quad (3)$$

Bei gleichzeitig hohem Durchfluss  $Q$  muss aufgrund der großen zu schluckenden Wassermengen das Laufrad einen großen Durchmesser aufweisen, woraus sich wiederum geringe Drehzahlen ergeben.

Um verschiedene Turbinen hinsichtlich ihrer Schnellläufigkeit vergleichen zu können, wird die spezifische Drehzahl herangezogen. In der Zeit von Viktor Kaplan kam mit  $n_s$  nach Gl. (4) eine etwas unterschiedliche Definition zu der heute gebräuchlichen Form  $n_q$  laut Gl. (5) zur Anwendung:

$$n_s = n \cdot \frac{\sqrt{P}}{H \cdot \sqrt[4]{H}} \quad (4)$$

In der älteren Form bezieht sich die spezifische Drehzahl auf ein Laufrad, welches bei einem Gefälle von 1 m eine Leistung von 1 PS bzw. 0,736 kW erbringt. Betrachtet man die Definition nach Gl. (4), so ist ersichtlich, dass durch die Leistung  $P = P(\eta)$  die spezifische Drehzahl vom jeweiligen Turbinenwirkungsgrad  $\eta$  abhängig ist. Folglich weisen durch diese Definition Turbinen mit einem höheren Wirkungsgrad eine höhere spezifische Drehzahl auf.

Um dem entgegenzuwirken wird heutzutage für die spezifische Drehzahl die Kennzahl  $n_q$  nach Gl. (5) verwendet. Diese ist nicht auf die Leistung von 1 PS bezogen, sondern auf einen Durchfluss

von 1 m<sup>3</sup>/s. Dadurch entfällt beim Vergleich unterschiedlicher Turbinen der Einfluss unterschiedlicher Wirkungsgrade:

$$n_q = n \cdot \frac{\sqrt{Q}}{\sqrt[4]{H^3}} \quad (5)$$

Aus Gl. (5) ist im Weiteren ersichtlich, dass sich  $n_q$  umso mehr erhöht, je größer  $Q$  und je kleiner  $H$  wird. Dies kommt besonders bei der Wasserkraftnutzung von Flüssen, welche einen großen Durchfluss bei kleiner Fallhöhe liefern, zum Tragen.

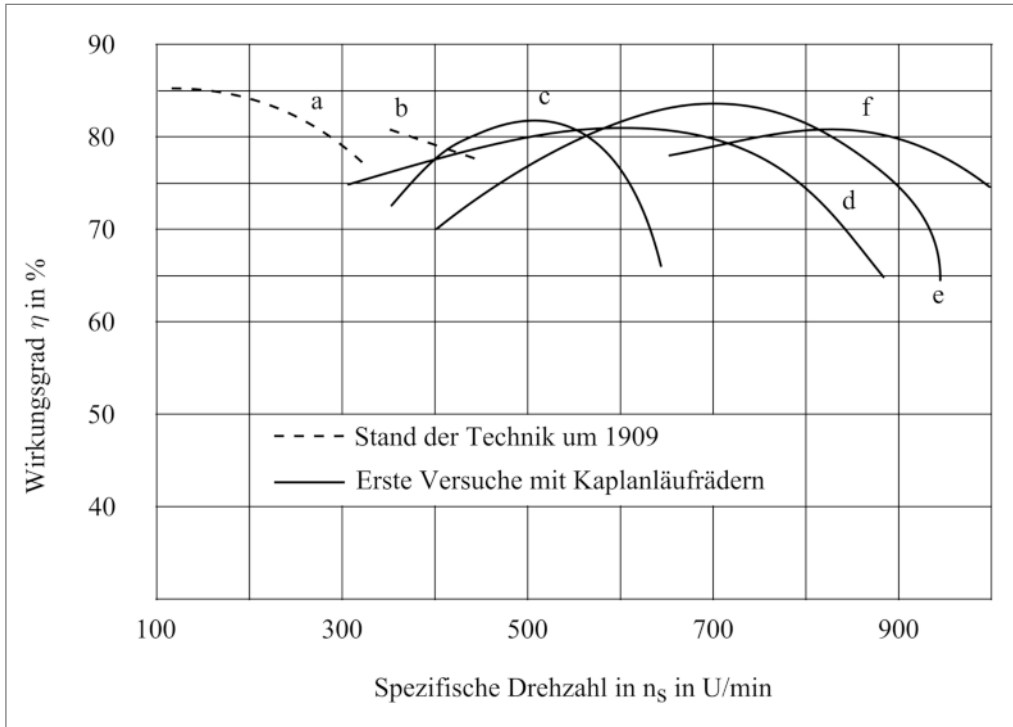
Um die historischen Daten gegebenenfalls mit heutigen Bereichen vergleichen zu können, kann eine Umrechnung durch Gl. (6) erfolgen [1]:

$$n_s \sim 3,34 \cdot n_q \quad (6)$$

Werden nun die drei heutigen Hauptturbinenarten hinsichtlich ihrer spezifischen Drehzahl charakterisiert, so ergibt sich eine Steigerung, ausgehend von der kleinsten bis hin zur größten spezifischen Drehzahl, d. h. von Pelton- über Francis- hin zu Kaplan-Turbinen.

Erste Versuche von Viktor Kaplan zur Steigerung der spezifischen Drehzahl mit der von ihm entwickelten Kaplan-Turbine sind in **Bild 2** ersichtlich. Darin wird durch die Linien a und b der damalige Stand der Technik bezüglich Schnellläufigkeit von Francis-Turbinen dargelegt. Die Linien bilden somit den Ausgangspunkt seiner Forschungstätigkeiten zur Steigerung der Schnellläufigkeit.

Die Linien c bis f kennzeichnen Ergebnisse von ersten Kaplanlaufrädern. Linie f stellt ein Laufrad dar, welches während dem Ersten Weltkrieg in Brunn entstand und zeigt, dass selbst bei spezifischen Drehzahlen  $n_s$  von 900 noch Wirkungsgrade von 80 % möglich waren. Somit konnte die spezifische Drehzahl von den zu dieser Zeit schnellsten Francis-Turbinen bei ähnlich hohem Wirkungsgrad um rund das Dreifache übertroffen werden. Im Mai 1913 verständigte Viktor Kaplan verschiedene Turbinenbaufirmen, dass es ihm gelungen sei, mit neuen Laufrädern spezifische Drehzahlen und Wirkungsgrade zu erreichen, welche die bisher bestehenden Laufräder um ein vielfaches übertrafen [2]. Um die spezifische Drehzahl derart steigern zu können, musste Viktor Kaplan vorhandene Wege verlassen und gänzlich neue Richtungen einschlagen.



**Bild 2:** Übersicht über Wirkungsgrade und spezifische Drehzahlen von Francis-Schnellläufern und Kaplan-Turbinen aus der Zeit Viktor Kaplans [6]

### 3 Die Entwicklungsschritte von der Francis- zur Kaplan-Turbine

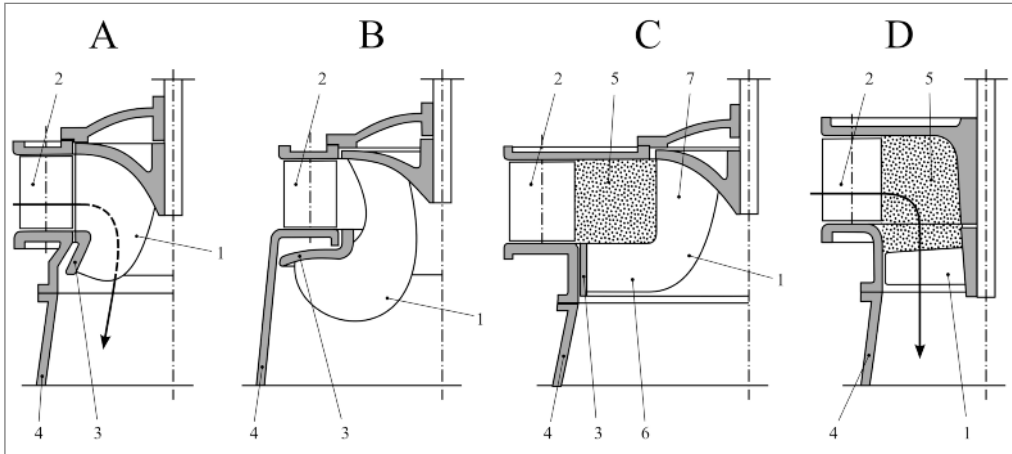
„Langsam tastend schritt ich vorwärts, jedesmal die Natur durch den Versuch befragend, bis ich von den zellenförmigen Laufradschaufeln zu den Laufrädern mit flügelartigen Schaufeln kam.“ (Viktor Kaplan [5]).

Viktor Kaplan beschäftigte sich ca. ab 1903 mit der Erhöhung der Schnellläufigkeit und der Wirkungsgrade von Francis-Turbinen. Sein besonderes Augenmerk lag dabei auf der Verbesserung der Laufradschaufeln. Bald wurde ihm jedoch klar, dass durch die Anzahl und Form der Schaufeln eine Steigerung der Schnellläufigkeit nicht möglich war, ohne den Wirkungsgrad massiv zu verschlechtern.

Seine Entwicklungsschritte sind schematisch in **Bild 3** dargestellt. Dabei ging Viktor Kaplan bei seinen praktischen sowie theoretischen Versuchen von Francis-Laufrädern (A) aus, bei denen er versuchte, die spezifische Drehzahl durch im-

mer neuere Schaufelformen zu verbessern. Beispielsweise versuchte er, durch die eingezogene Eintrittskante, einen erweiterten Schaufelkranz und eine Reduzierung der Schaufelanzahl die Schluckfähigkeit sowie durch die reduzierten Schaufeln auch die Reibung zu verringern (B). Doch durch diese Maßnahmen konnte die spezifische Drehzahl nicht gesteigert werden, es zeigten sich Ablösungen im Saugrohr sowie einer starken Verwirbelung der Strömung unter dem Laufradkranz.

Nach zahlreichen Versuchen baute Viktor Kaplan ein Laufrad, welches als Zwischenstufe zwischen Francis- und Kaplan-Turbine gewertet werden kann (C). Einerseits ist der Außenkranz nicht mehr erweitert und andererseits wird der obere Teil der Laufradschaufeln vom Wasser radial und durch den unteren Teil vorwiegend axial durchflossen. Zwischen dem Leitradaustritt und dem Laufradeintritt, befindet sich ein großer Ringraum, der sogenannte „schaufellose Raum“. In diesem kann sich die



**Bild 3:** Schematische Darstellung der Entwicklungsschritte von der Francis- zur Kaplan-Turbine: 1) Laufradschaufel, 2) Leitrad, 3) äußerer Laufradkranz, 4) Saugrohr, 5) schaufelloser Raum, 6) axialer Schaufelraum, 7) radialer Schaufelraum [1]

Strömung frei ausbilden. Versuche an diesem Laufrad wiesen schon bessere Werte im Hinblick auf die spezifische Drehzahl auf. Zudem konnten die Wirbel am Laufradaustritt verbessert und die Schluckfähigkeit erhöht werden. Schlussendlich entschied sich Kaplan dazu, die radialen Zonen im Laufrad zu entfernen, um zu einer kranzlosen, axial durchflossenen Laufradform zu kommen (D). Es zeigte sich daraufhin eine starke Erhöhung der spezifischen Drehzahl sowie des Wirkungsgrades. Die Kaplan-Turbine war geboren.

Jedoch stellten Viktor Kaplan die Ergebnisse seiner neuen Laufradform noch nicht ganz zufrieden. Der maximale Wirkungsgrad seines entwickelten Laufrades stellte sich offensichtlich nur bei einer bestimmten Durchfluss- und Drehzahlkombination ein. Der Durchfluss wurde dabei durch eine bestimmte Stellung der Leitschaufeln bei konstanter Fallhöhe erreicht. Wurde diese Einstellung geändert, so sank der Wirkungsgrad rapide ab [2].

#### 4 Erweiterung des Betriebsbereiches durch im Betrieb verstellbare Laufradschaufeln

„Als die Wirkungsweise der bei ... Betriebsstillstand von Hand durchgeführten ... Laufschaufelregelung überraschend gute Ergebnisse zeigte, machte ich den Versuch, die Schaufeln während des Versuches zu verstellen.“ (Viktor Kaplan [10]).

Heutzutage können Kaplan-Turbinen durch drei unterschiedliche Arten geregelt werden. Die Regelung kann dabei einfach durch den Leitapparat, doppelt durch Leitapparat sowie Laufrad oder dreifach durch Leitapparat, Laufrad und Drehzahl erfolgen.

Viktor Kaplan konnte schon in einem frühen Entwicklungsstadium diverse Gesetzmäßigkeiten im Betrieb seiner neu erfundenen Turbine erkennen. Um das bereits aufgegriffene Problem des starken Wirkungsgradabfalls abseits eines bestimmten Betriebspunktes beschreiben zu können, soll im Folgenden die Regelung eines axialen Schnellläufers beschrieben werden. Dieser wird bei geringer Fallhöhe sowie großem Durchfluss betrieben. Anhand eines schematischen Kennfeldes lassen sich die verschiedenen, im Betrieb auftretenden Betriebspunkte thematisieren. Im Wesentlichen gelten die folgenden Aussagen auch für das von Viktor Kaplan entworfene Laufrad mit feststehenden Laufradschaufeln.



Die Einsatzgrenzen eines axialen Schnellläufers lassen sich einerseits durch die minimale  $H_{\min}$  bzw. maximale Fallhöhe  $H_{\max}$  sowie durch die entsprechende Leitradöffnung nach **Bild 4** festhalten. Im Weiteren wird in der Regel die obere Grenze des Betriebsbereichs durch die maximale Leistungskurve des Generators festgelegt. Ausgehend vom Durchfluss im Bestpunkt kann der Betriebsbereich in Teillast und Überlast unterteilt werden.

Im schematischen Kennfeld nach Bild 4 ist der Bestpunkt, d. h. der Betriebspunkt der Turbine bei dem der maximale Wirkungsgrad auftritt, dargestellt. Dieser ist bei einem bestimmten Durchfluss sowie Fallhöhe gegeben. Ausgehend davon kann ein Bereich für die drallfreie Abströmung definiert werden, bei dem kein Wirbelzopf im Saugrohr und somit keine damit verbundenen, erhöhten Verluste auftreten.

Wird die Turbine im Bestpunkt betrieben, so ist die An- und Abströmung des Laufrades schaufelkongruent. Somit ergibt sich eine drallfreie Abströmung nach dem Laufrad, ausgedrückt durch  $c_2 = c_{m2}$ .

Bei Teillastbetrieb der einfach geregelten Turbine ist der aktuelle Durchfluss  $Q$ , welcher proportional zur Meridiangeschwindigkeit  $c_{m1}$  ist, kleiner als der Nenndurchfluss  $Q_N$ . An der Eintrittskante der Schaufel erfolgt die Anströmung saugseitig, wodurch es, aufgrund der lokalen Unterschreitung des Dampfdruckes, zu druckseitigen Kavitationserscheinungen kommen kann. Am Austritt aus dem Laufrad ergibt sich durch  $c_{u2} > 0$  der Drall in Laufraddrehrichtung.

Analog kann der Betrieb im Überlastbereich betrachtet werden. Dabei ist der aktuelle Durchfluss  $Q$  größer  $Q_N$ , ausgedrückt durch eine erhöhte Meridiangeschwindigkeit  $c_{m1}$ . Die Anströmung erfolgt auf der Druckseite der Schaufel und kann somit zu saugseitigen Kavitationserscheinungen führen. Der Drall bildet sich aufgrund von  $c_{u2} < 0$  entgegen der Laufraddrehrichtung aus.

Die Ausbildung eines Wirbelzopfes im Saugrohr resultiert in einer Wirkungsgradabnahme der Turbine. Auch Viktor Kaplan erkannte durch in die Strömung gehaltene Hanffäden bereits, dass sich im Saugrohr ein Wirbelzopf entweder in oder gegen die Laufraddrehrichtung ausbilden konnte [10]. Er kam dadurch zu dem Entschluss, dass das Laufrad den veränderlichen Anströmverhältnissen angepasst werden müsste. Er erkannte, dass

für die veränderlichen Bedingungen streng genommen jedes Mal ein neues Laufrad benötigt werden würde. Aus dieser Idee heraus entwarf er schlussendlich die verstellbaren Laufradschaufeln. Dadurch war es möglich, in einem sehr weiten Betriebsbereich einen hohen Wirkungsgrad bei gleichzeitig hohen spezifischen Drehzahlen zu erreichen [2].

Diese Möglichkeit soll anhand einer doppelt geregelten Turbine in **Bild 5** dargestellt werden, wobei die Kurvenverläufe in einem Diagramm mit  $\eta$  und  $a_0$  über  $Q_{11}$  dargestellt sind und der Einheitsdurchfluss  $Q_{11}$  wie folgt definiert ist:

$$Q_{11} = \frac{Q}{D^2 \cdot \sqrt{H}} \left[ \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right] \quad (6)$$

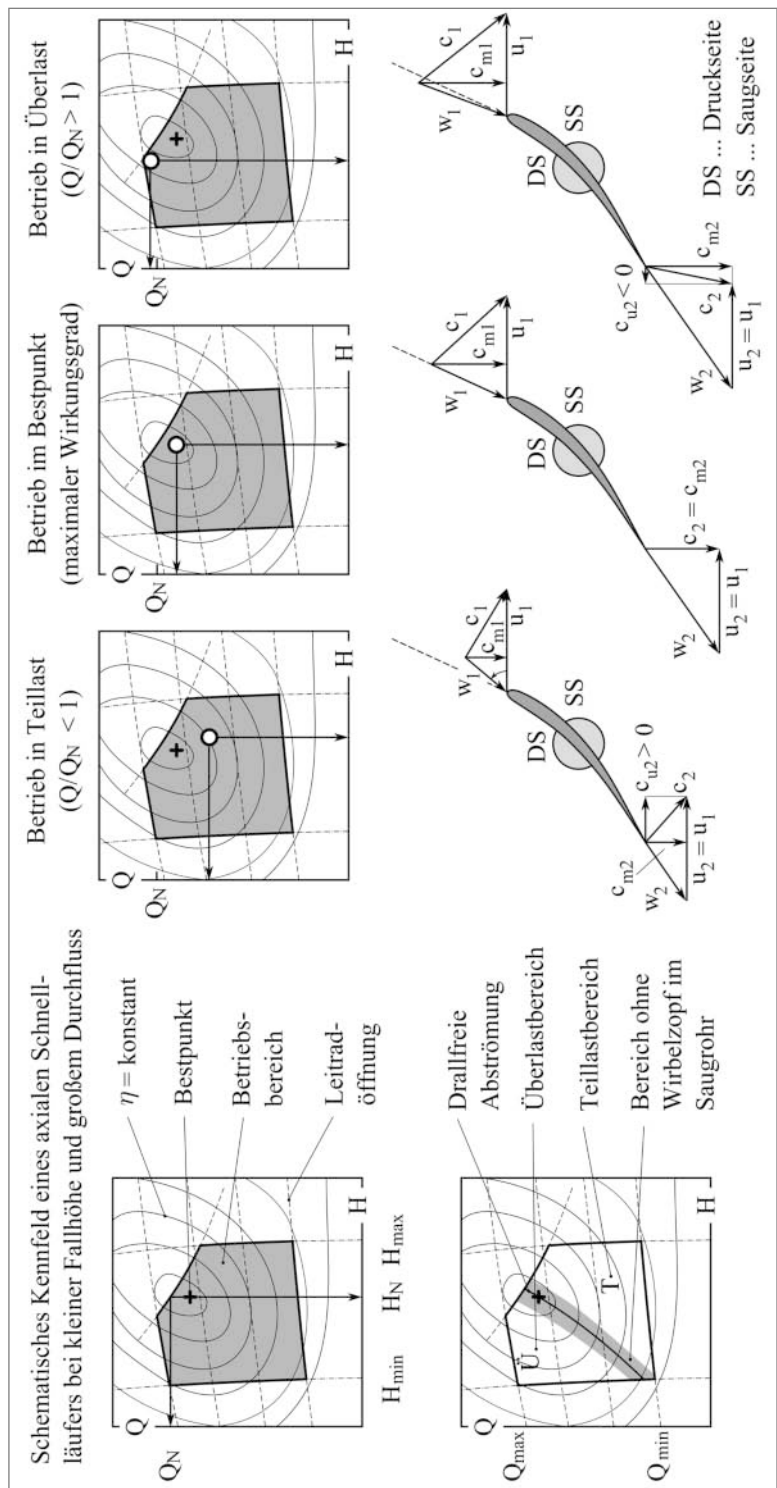
Dabei bezeichnet  $\phi$  den Laufradwinkel und  $a_0$  die Leitradöffnung. Die einzelnen Propellerkurven entstehen durch feste Laufradwinkel und veränderliche Leitradöffnungen, wie dies bei einfach geregelten Turbinen der Fall ist. Ein Betrieb abseits des Optimums, in Teillast- bzw. Überlastbetrieb, bewirkt einen raschen Wirkungsgradabfall. Durch einen optimalen Zusammenhang von Leitradöffnung und Laufradwinkel kann eine die Propellerkurven einhüllende Wirkungsgradkurve erreicht werden. Dies resultiert in einem hohen Wirkungsgradniveau über einen weiten Betriebsbereich [7].

Viktor Kaplan entwickelte also erfolgreich die Möglichkeit der Doppelregelung. Eine dreifache Regelung der Kaplan-Turbine wurde erst Jahrzehnte später durch die Variation der Drehzahl mittels Frequenzumrichter realisiert. Diese war zu Zeiten Viktor Kaplans technisch gesehen jedoch noch in weiter Ferne.

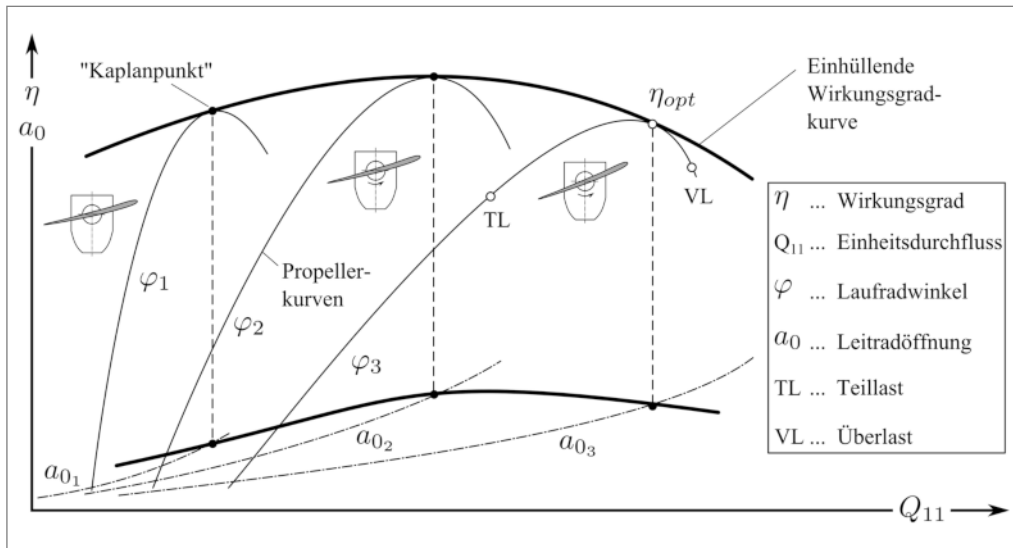
## 5 Die Bedeutung des Saugrohres für die Kaplan-Turbine

„Den geeigneten Krümmer zu finden war das Ziel meiner langjährigen und mühevollen Arbeit.“ (Viktor Kaplan [10]).

Viktor Kaplan erkannte, dass für eine schnelllaufende Turbine der gesamte Strömungsvorgang nicht nur in der Turbine selbst, sondern auch im Saugrohr in Betracht gezogen werden musste. Aufgrund der hohen Austrittsenergie des Wassers aus dem Laufrad muss auf die Rückgewinnung der Geschwindigkeitsenergie besonders Augen-



**Bild 4:** Einfache Regelung von Turbinen am Beispiel eines axialen Schnellläufers [7]



**Bild 5:** Schematische Darstellung einer zweifach geregelten Turbine [7]

merk gelegt werden [2]. Um trotz der hohen kinetischen Energien am Austritt der Turbine einen entsprechenden Wirkungsgrad erreichen zu können, muss der größte Teil der Austrittsenergie durch das Saugrohr zurückgewonnen werden.

Besonders bei Kaplan-Turbinen spielt die Energierückgewinnung eine sehr große Rolle. Die Austrittsverluste können im optimalen Betriebspunkt bis zu 50 % der zur Verfügung stehenden Totalenergie betragen [8]. Dies ist schematisch und verlustfrei betrachtet in **Bild 6** dargestellt. Nach dem Laufrad erreicht die Geschwindigkeitsenergie in etwa die gleiche Größenordnung wie die Nettofallhöhe. Die mögliche Druckrückgewinnung ist mittels Drucklinie grafisch veranschaulicht.

Wie bereits beschrieben erkannte Kaplan, dass der Saugrohrkrümmer jeweils an das entsprechende Laufrad angepasst werden musste. Dazu führte er Versuche an Krümmermodellen durch, welche er aus Weißblech zusammenlötete. Viktor Kaplan selbst fühlte beim Austrittsquerschnitt mit der Hand die Stärke der Strömung und konnte so nach ca. 100 Modellen die richtige Saugrohrform aus diesen Versuchen ableiten [5]. Einmal mehr zeigten sich bei diesen Versuchen seine praktischen Begabungen und Fähigkeiten.

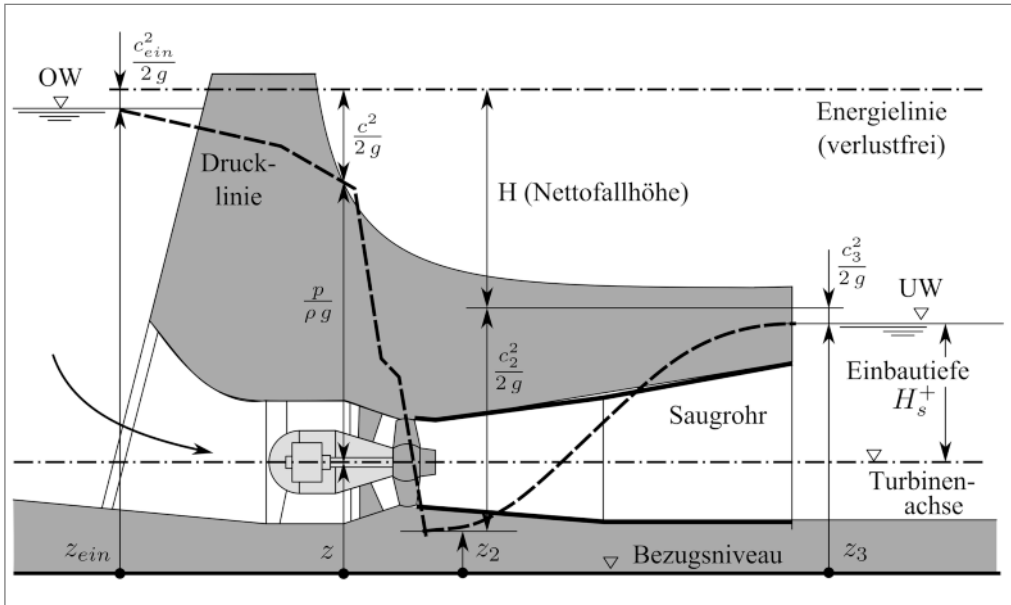
Zur Zeit der ersten Versuche mit Kaplan-Turbinen war über das Phänomen der Kavitation in

der damaligen Fachwelt noch recht wenig bekannt. Dies hatte zur Folge, dass sich Viktor Kaplan erste kavitationsähnliche Erscheinungen an seiner neu entwickelten Turbine nicht erklären konnte. Viel Zeit und Rückschläge musste er investieren und hinnehmen, um dieses Problem lösen zu können. Schlussendlich hatte Kaplan auch hier eine passende, technische Lösung entwickelt und erkannte, dass durch die richtige Einbautiefe der Turbine sowie einer entsprechenden Ausbildung der Laufradschaufeln und des Saugrohres Kavitationserscheinungen entgegengewirkt werden können [11].

## 6 Die Kaplan-Turbine, eine herausragende Erfindung ihrer Zeit

„Zunächst ist der Strömungsvorgang versuchsmäßig zu erforschen und zwar so gewissenhaft als möglich. Dann ist die Naturströmung mathematisch so abzubilden, dass wir diese formelmäßig beherrschen. Bei sorgfältiger Behandlung dieser Aufgaben wird sich ein Weg finden lassen, der uns aus den Irrwegen heraus zum Ziele führt. Nach diesen Leitsätzen ist schließlich die Kaplan-Turbine entstanden.“ (Viktor Kaplan [10]).

Die Erfolgsfaktoren für die bahnbrechende Entwicklung der Kaplan-Turbine mögen vielfältig



**Bild 6:** Schematische Darstellung von Energie- und Drucklinie an einer Rohrturbine [8]

sein. Hauptsächlich sind sie auf den unbändigen Erfindergeist und die praktische sowie gleichzeitig theoretische Begabung Viktor Kaplans zurückzuführen, der sich auch durch Rückschläge und Patentstreitigkeiten nie entmutigen lies. Bei der Entwicklung standen praktische Versuche stets an erster Stelle. Sein unbändiger Wille und sein Durchhaltevermögen halfen ihm, die von der Natur gezeigten Gesetzmäßigkeiten bei der Entwicklung der Kaplan-Turbine zu verstehen und stets in mathematische Modelle überzuführen.

Als einen wesentlichen Erfolgsfaktor gibt Viktor Kaplan das Turbinenlabor an der Technischen Hochschule Brünn an [10]. Es ermöglichte ihm in einer verhältnismäßig kurzen Zeit von 10 Jahren, eine Vielzahl von Versuchen durchzuführen, die schlussendlich zur Entstehung und Serienreife der Kaplan-Turbine führten. Hauptsächlich lagen die Vorteile gegenüber großen Turbinenversuchsanstalten in der unkomplizierten sowie schnellen Herstellung aller Versuchsgegenstände. Umso bemerkenswerter ist es, dass Viktor Kaplan mit den verhältnismäßig einfachen Mitteln diese bahnbrechende Entwicklung realisieren konnte.

Viktor Kaplan behauptete sich auch bei der Verwertung seiner Erfindung. Gegen viele Konkurrenten und Neider setzte er sich mit großer

Beharrlichkeit durch. Beispielsweise wurden die von ihm gewonnen Ergebnisse nicht sofort publiziert, sondern er suchte den Kontakt zu der Industrie und wollte seine Turbine auf diesem Weg verwerten [2]. Auch wurden Patentanträge von ihm übersetzt und mit viel Eigenleistung die patentrechtliche Absicherung seiner Erfindung sichergestellt.

Somit gilt Viktor Kaplan heute als ein genialer Erfinder seiner Zeit, der stets auf die Antworten der Natur in praktischen Versuchen hörte und mittels persönlichen Willen sowie Durchsetzungskraft die Geschichte der Wasserkraft maßgeblich prägte.

## Autoren

**Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.-Ing. Christian Bauer**

**Dipl.-Ing. Stefan Gössinger**

Technische Universität Wien

Getreidemarkt 9/E302

1060 Wien, Österreich

cbayer@mail.tuwien.ac.at

stefan.goessinger@tuwien.ac.at



## Literatur

- [1] Gschwandtner, M.: Gold aus den Gewässern, Viktor Kaplans Weg zur schnellsten Wasserturbine. 2. Auflage. Norderstedt: GRIN Verlag, 2011.
- [2] Lechner, A.: Viktor Kaplan. In: Blätter für Geschichte der Technik, 1936.
- [3] Kaplan, V.: Ein neues Verfahren zur Berechnung und Konstruktion der Francis-Turbinen-Schaukel. In: Zeitschrift für das gesamte Turbinenwesen, 1905.
- [4] Kaplan, V.: Theoretische Untersuchungen und deren praktische Verwertung zur Bestimmung rationeller Schaufelformen für Schnellläufer. In: Zeitschrift für das gesamte Turbinenwesen, 1906.
- [5] Kaplan, V.: Wie die Kaplan turbine entstand. In: Wasserkraftjahrbuch 1925/1926.
- [6] Kaplan, V.: Die neue Wasserturbine und ihre Beziehungen zur Wasserwirtschaft. In: Die Wasserwirtschaft, 1917.
- [7] Brost, V.; Reinhardt, H.: Leistungsausbeute bei einfach, doppelt und dreifach regulierten Turbinen. 6. Seminar Kleinwasserkraft, 2007.
- [8] Deniz, S; Bosshard, M; Speerli, J; Volkart, P.: Saugrohre bei Flusskraftwerken. In: Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich (1990), Nr. 106.
- [9] Kaplan, V.: Bau rationeller Francis turbinen – Laufräder und deren Schaufelformen für Schnell-, Normal- und Langsam-Läufer. München, Berlin: R. Oldenburg Verlag, 1908.
- [10] Kaplan, V.: Die Entwicklung des Kaplanlaufrades. In: Wasserkraftjahrbuch 1927/1928.
- [11] Kaplan, V.: Kavitationserscheinungen bei Turbinen mit großer Umlaufgeschwindigkeit. In: Wasserkraftjahrbuch 1924.

Christian Bauer and Stefan Gössinger

### The Development of the Kaplan Turbine

The Kaplan turbine, developed at the beginning of the 20<sup>th</sup> century, represents one of the three main turbine types used nowadays. At the beginning of the last century, experts were particularly driven by the aim to extend the application range of existing water turbines regarding to their specific speed. This fact became necessary by new needs in the electrical industry sector. However, research at Francis runners couldn't realize these requirements. This was also recognized from Viktor Kaplan, who was able to invent the Kaplan turbine out of these findings.

Кристиан Бауер и Штефан Гёссингер

### Создание турбины Каплана

Турбина Каплана разрабатывалась в начале 20-го столетия и представляет собой, наряду с турбинами Пелтона и Френсиса, один из основных видов турбин, используемых в настоящее время. В то время особой целью широкого круга специалистов было усовершенствование существующих гидротурбин с точки зрения их быстроходности. Тем не менее, исследовательская деятельность по изучению рабочих колес турбины Френсиса не привела к достижению этой цели. Виктор Каплан понял проблему и на основе накопленного опыта разработал турбину, названную его именем.

Leopold Heninger und Hermann Schweickert

# Viktor Kaplan und seine Turbine bei Voith

1913 meldete Viktor Kaplan sein Kaplan-Turbinen-Patent an, und es dauerte bis 1922, dass Voith seine erste Kaplan-Turbine baute. Der Beitrag erzählt die wechselvolle Beziehung zwischen Viktor Kaplan und Voith bei der Einführung der Kaplan-Turbine in den Wasserkraftmarkt und schließt mit einem Überblick auf einige gegenwärtige Kaplan-Projekte bei Voith.

## 1 Der Wasserturbinenbau bei Voith in der Ära Friedrich Voith 1867 bis 1913

1825 übernahm Johann Matthäus Voith von seinem Vater eine kleine Schlosserei in Heidenheim an der Brenz, Deutschland, um diese, mittlerweile auf 30 Mitarbeiter angewachsen, 1867 an seinen Sohn Friedrich Voith zu übergeben – jenes Jahr, das als offizielles Gründungsdatum des heutigen Voith-Konzerns gilt. Friedrich Voith, ein tatkräftiger, entschlossener Mann, baute das Unternehmen zügig aus und kam als Hersteller von Holzschleifern für die Papierindustrie auf die Idee, Wasserturbinen als Antrieb einzusetzen. 1870 baute Voith die erste Turbine – eine Jonval-Turbine mit 100 PS, 1873 die erste Francis-Turbine mit einer Neuerung, dem regulierbaren Leitapparat (Fink'sches Leitrad). 1879 führte Voith den Turbinenregler am Markt ein (Pfarr'scher Turbinenregler), 1886 fertigte Voith die erste Francis-Spiralturbine. Müller [1] beschreibt rund vierzig, zum Teil einander ähnliche Turbinenarten, die am Wasserkraftmarkt bis 1900 gebaut wurden, und erläutert die Verdienste Voiths um die Etablierung der Francis-Turbine. 1904 lieferte Voith die damals weltweit leistungsstärksten Francis-Turbinen (11 500 PS) für die Niagara-Fälle in Kanada. Nach anfänglichem Zögern stellte Voith 1903 seine erste Pelton-Turbine mit 12 PS her. Bereits 1913 folgten Pelton-Turbinen mit 16 500 PS für Rjukan in Norwegen. Damit hatten diese beiden Bauweisen mehr oder weniger alle anderen Turbinentypen vom Markt verdrängt.

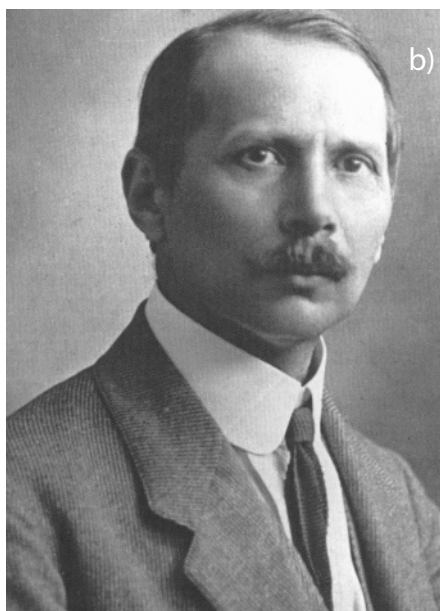
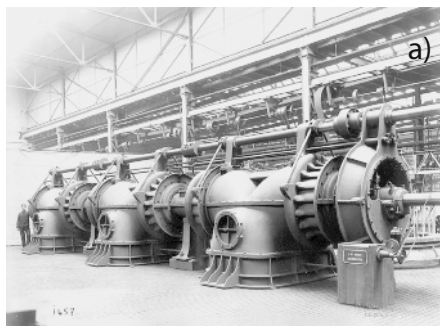
Um 1900 drohten erhöhte Einfuhrzölle das Exportgeschäft von Voith Heidenheim nach Öster-

reich-Ungarn lahmzulegen, weshalb Friedrich Voith den Entschluss fasste, ein Werk in der Donaumonarchie zu gründen. Es wurde St. Pölten in Niederösterreich als Standort ausgewählt. Walther Voith, vor Hermann und Hanns der älteste Sohn Friedrich Voiths, der damals gerade in den USA war, wurde vom Vater nach Europa zurückbeordert und 1903 mit dem Aufbau des Werkes in St. Pölten betraut. Nach nur neun Monaten war das Werk operativ, noch im selben Jahr wurde die erste Turbine ausgeliefert, und ab 1904 war Walther Voith gemeinsam mit seinem Vater Gesellschafter in St. Pölten.

## 2 Das Jahr 1913

Nach dem Tod Friedrich Voiths am 17. Mai 1913 waren im Werk Heidenheim alle drei Söhne Gesellschafter, in St. Pölten Walther Voith allein. Als ältestem Sohn, aber auch als Gesellschafter in beiden Werken fiel ihm 39-jährig die Rolle des Seniorchefs zu, wie er sich in seinem „Rückblick“ bezeichnete, eine Aufgabe, die er von St. Pölten aus erfüllte. In Heidenheim arbeiteten 2 280 Beschäftigte, in St. Pölten 700. Rund 6 500 Turbinen waren bereits ausgeliefert, davon 50 % im Export. Damit nahm Voith im weltweiten Wasserturbinenbau eine führende Rolle ein.

Die Francis-Turbinen waren mittlerweile an einer wirtschaftlich gesehen unteren Grenze für den Ausbau großer Flüsse mit geringen Fallhöhen gestoßen. Die großen Volumenströme wurden deshalb bereits durch Francis-Zwillingsturbinen in doppelter oder gar dreifacher Anordnung abgear-



**Bild 1:** a) Dreifach-Zwillingsturbinen Warkaus, Finnland; b) Viktor Kaplan

beitet (**Bild 1a**). Der Markt verlangte dringend nach einem Turbinentypen großer Schnelligkeit.

Am 28.12.1912 meldete Viktor Kaplan (**Bild 1b**) sein erstes Patent zur Kaplan-Turbine an (OP 734388, Eine Kreiselmaschine mit radialem Leitrad und vorwiegend axial durchflossenem Laufrad) und am 7. August 1913 sein zweites, das eigentliche „Kaplan-Patent“ (ÖP 74244, Verstellbare Laufschaufeln). Er reagierte damit auf den Bedarf nach Turbinen mit größerer Schluckfähigkeit, größeren Drehzahlen, aber in kleinerer Bauweise als Francis-Turbinen.

Auf einen früheren Besuch bei Voith bezugnehmend schrieb Viktor Kaplan aber bereits Anfang 1913 an Voith in Heidenheim: „... Bei dieser Gelegenheit will ich Ihnen schon heute eine Sie vielleicht interessierende Mitteilung machen, deren Bedeutung Ihnen wohl ohne weiteres klar sein wird. Durch langwierige mühevollen Versuche ist es mir in meinem Laboratorium gelungen, eine Versuchsturbine auszubilden, welche bei einer spezifischen Drehzahl  $n_s$  von 450 noch rund 75 % Wirkungsgrad aufweist. Dabei ist jedoch der Laufraddurchmesser nur 90 mm. Derzeit bin ich daran, auf diesem Weg fort zu schreiten und erwarte bei den neuen Konstruktionen selbst bei einem  $n_s$  von 600 noch einen brauchbaren Wirkungsgrad. Bis dahin möchte ich allerdings mit der Vorführung der Versuche warten, möchte Sie jedoch schon heute fragen, ob Sie sich für die Übernahme dieser zum Patente angemeldeten Laufradkonstruktion interessieren würden.“

Erhard Closs, damals Leiter des Turbinenbaus bei Voith, war natürlich daran interessiert und vermerkte am Schluss seines positiven Antwortschreibens, dass Voith das Laufrad gerne in seiner eigenen Versuchsanstalt „bremsen möchte“.

Nach dem ersten Briefwechsel dauert es drei Monate, bis Kaplan antwortete. Er habe ein neues Laufrad mit höherer Schnelligkeit und besseren Wirkungsgraden entwickelt. Dazu gäbe es auch eine dreidimensionale Turbinentheorie. Zeichnungen lagen bei, zeigten jedoch verständlicherweise nur ein Laufrad mit festen statt verstellbaren Schaufeln. Kaplan schlug vor, dass ein Voith-Mitarbeiter umgehend in seinem Laboratorium die neue Turbine abnehmen und auch für einen Lizenz-Vertragsabschluss bevollmächtigt sein solle. Das, notierte Erhard Closs am Briefrand, könne nur nach Messungen in Heidenheim zustande kommen. Dennoch versuchte Viktor Kaplan weiterhin, vorrangig mit Voith zu einer Einigung zu kommen. In einem Brief erwähnte er, „... dass nur eine Weltfirma eine derart weitgreifende Aktion auf dem Turbinenbau zu befriedigendem Erfolg führen kann.“

Entgegen seinen Beteuerungen hatte Viktor Kaplan jedoch auch mit anderen Turbinenbaufirmen mit identischem Wortlaut Kontakt aufgenommen. Diese entsandten Vertreter nach Brünn, wo Kaplan an der Technischen Universität seinen Turbinenprüfstand betrieb, errichteten die Versuche

aber als zu ungenau. Kaplan war nicht bereit mehr zu zeigen, auch nannte er seinen Patentanspruch nicht. Kaplans Unterfangen, mit verschiedenen Firmen einen Vertrag abzuschließen, führten dazu, dass sich diese unter der Führung von Voith Heidenheim zur Kaplan-Vereinigung – bestehend aus J. M. Voith (Heidenheim), Escher, Wyss & Cie (Zürich), Briegleb, Hansen & Co. (Gotha), Amme, Giesecke & Konegen AG (Braunschweig) – zusammenschlossen, um nun gemeinsam mit Kaplan zu verhandeln. Weitere Verhandlungen ergaben nichts, erst nachdem die deutsche Patentschrift am 30. November 1913 ausgelegt wurde, führte die Kaplan-Vereinigung konkrete Gespräche mit Viktor Kaplan. Es waren insbesondere die Brüder Hanns und Herrmann Voith, die sich für eine Verständigung einsetzten. Doch erst am 23. Februar 1915 kam es zu einem Vertragsabschluss, der die Herstellung von je einer stehenden und einer liegenden Modellturbine nach Zeichnungen von Kaplan ermöglichte. Die Messungen sollten in der Versuchsanstalt Voiths in Hermaringen bei Heidenheim stattfinden.

### 3 Die erste Modellmessung 1916 bei Voith in Hermaringen

Bei Voith wurde der 24-jährige Hans Faic Canaan, seit 1913 im Unternehmen, beauftragt, die von Kaplan übergebenen Zeichnungen werkstattgerecht zu machen und die Modellversuche durchzuführen. Die Schaufeln, besonders in der Nähe der Nabe, sahen ziemlich bizarr aus – die damaligen Hydrauliker bezweifelten, dass das Ganze überhaupt funktionieren würde. Tatsächlich bedurfte es fünf Laufräder, bis ein stabiler Messbetrieb erreicht werden konnte. Zudem kam es zu kriegsbedingten Verzögerungen, so dass die ersten Versuche erst von Januar bis April 1916 durchgeführt werden konnten. Begleitet wurden sie zum Teil von Viktor Kaplan und seiner Frau Margarethe. „Frau Kaplan“, schrieb Hans Faic Canaan über diese Zeit, „stieg trotz der grimmigen Kälte jedes Mal vor und nach dem Versuch mit ihrem Mann und mir in den Turbinenschacht hinunter. Sie war sicherlich die erste Frau, die im Turbinenschacht in Hermaringen war. Es war für mich kein leichtes Arbeiten.“

Margarethe Kaplan blieb Hans Faic Canaan freundschaftlich verbunden. 1953 schrieb sie in einem Rückblick auf die anstrengende Zeit der

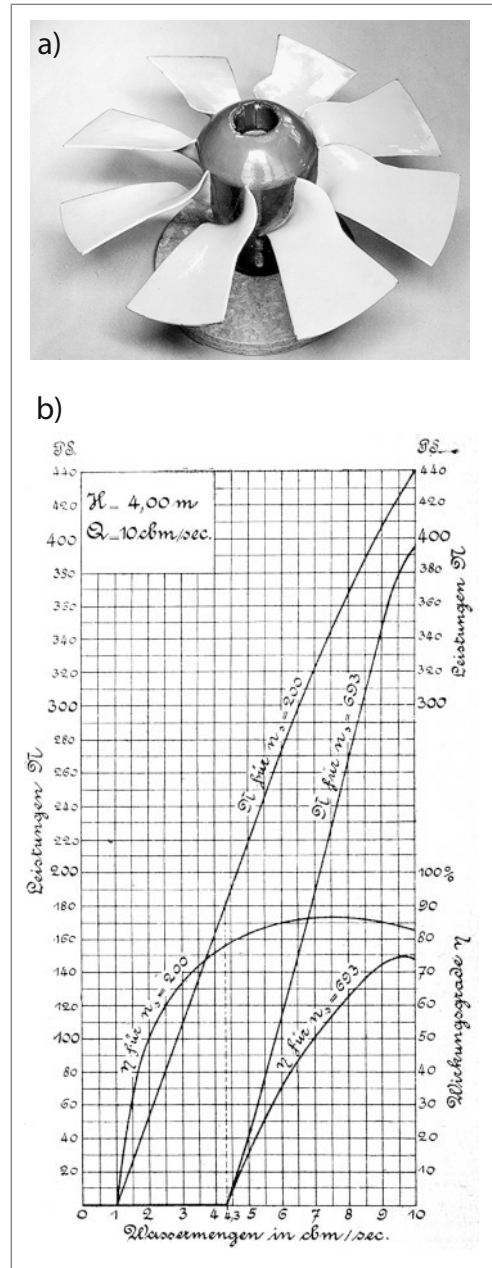
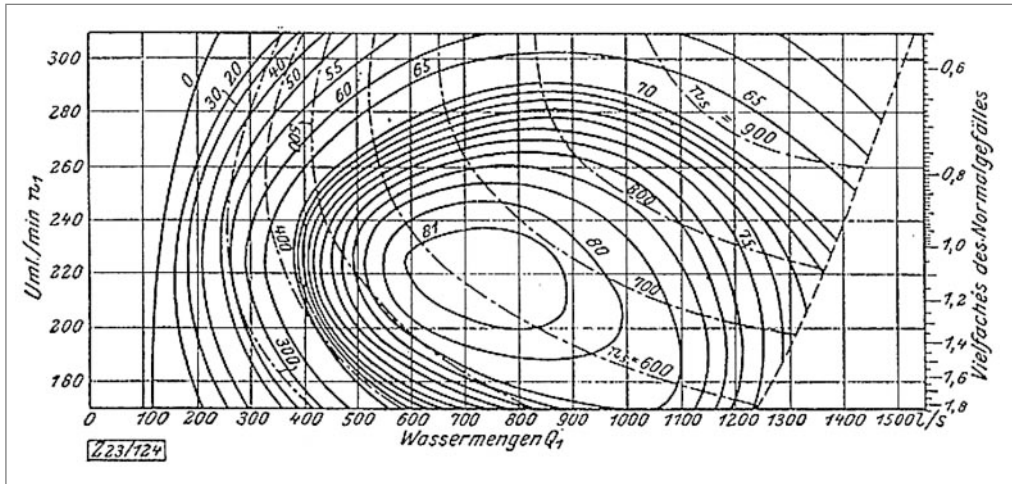


Bild 2: a) Kaplan-Propellerlaufrad 1916;  
b) Messung 1916





**Bild 3:** Ergebnis der Messungen 1921

Messungen 1916 (in deren Verlauf Viktor Kaplan zu ihr gesagt hatte: „Wenn du nicht da wärst, würde ich mich jetzt erschießen, Gretl!“): „... aber dann ist doch alles wieder aufwärts gegangen und der junge Versuchsingenieur ließ nicht locker, eine Idee nahm Gestalt an und machte sich nutzbar der ganzen Welt – wie herrlich.“

Die Messergebnisse von Hermaringen waren jedoch derart unbefriedigend, dass die Messungen nicht weiter fortgeführt wurden. Der Wirkungsgrad war 75 %, fiel jedoch bei Teillast sehr stark ab, nicht einmal mit einer herkömmlichen Francis-Turbine konnte das Kaplan-Rad mithalten. (**Bilder 2a und 2b**)

Es ist bis heute nicht nachvollziehbar, warum Kaplan ein Propellerrad anstatt eines Laufrades mit verstellbaren Schaufeln untersuchen ließ. Hans Faic Canaan berichtete in einem Vortrag 1950: „Leider hatte Professor Kaplan ein Laufrad mit festen Schaufeln, also ein Propellerrad gewählt ... Es ist außerordentlich zu bedauern, dass nicht seinerzeit eine doppelregulierte Kaplan-turbine gebaut und untersucht wurde. Die Ergebnisse hätten unangenehme Missverständnisse zwischen Erfinder und Unternehmer erspart und die Entwicklung stark beschleunigt.“

Die Kaplan-Vereinigung sah sich 1916 veranlasst, die Messungen folgendermaßen zu beurteilen: „Die Kaplan-turbine ist für heute und für absehbare Zukunft ein Embryo mit einer durchaus unsicheren Zukunft.“

#### 4 Stillstand, Unfrieden, Neuanfang und die erste Voith-Kaplan-Turbine

1917 und 1918 vergingen ohne erkennbare Aktivitäten. Im Gegenteil, zwischen der Vereinigung und Kaplan scheint Unfrieden geherrscht zu haben. Kaplan griff die Vereinigung mit dem Hinweis an, dass in Schweden bessere Ergebnisse erzielt wurden. Die Vereinigung vermutete verstellbare Laufschaufeln.

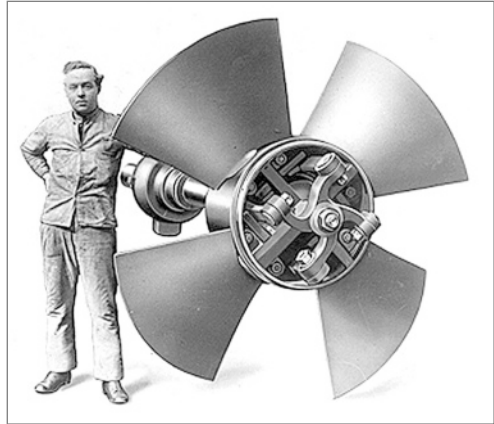
Nach dem Ende des Ersten Weltkriegs 1918 entwickelte sich die elektrische Versorgung rasant, und es entstand eine starke Nachfrage nach Wasserkraftwerken. Besonders an Flüssen wie Neckar, Main oder Weser in Deutschland wurden Staustufen zur Schiffbarkeit errichtet und Turbinen großer Schluckfähigkeit benötigt. Trotz jahrelanger Vorarbeit war bei Voith noch keine Kaplan-Turbine gebaut worden. Die Firma Storek aus Brünn dagegen bot gemeinsam mit Viktor Kaplan bereits Kaplan-Turbinen an, und Voith drohte den Anschluss zu verlieren.

Hier kam Walther Voith, selbst ausgebildeter Ingenieur, ins Bild. Von St. Pölten aus die Diskussionen beobachtend, schrieb er in ärgerlichem Ton nach Heidenheim, „... dass wir wohl keine Stunde länger mit verschränkten Armen dem Fortgang dieser Konstruktion gegenüber stehen dürfen“. Er erkannte die Vorteile der Kaplan-Turbine, argumentierte mit der Versuchsabteilung, die Schaufelzahl zu verringern, damit der Ver-

stellmechanismus Platz hatte. Und er hatte die Absicht, die Lizenz für Deutschösterreich und auch für noch lizenzfreie Staaten, insbesondere für die USA und Kanada, zu erwerben. Intern drängte er auf Beschlüsse sowie Aktivitäten und wies seine Akquisiteure und Verkäufer an, Gespräche mit Viktor Kaplan aufzunehmen und für einen Gesprächstermin zwischen ihm und Viktor Kaplan zu sorgen. Seine Reise zu Viktor Kaplan nach Brünn fiel Walther Voith so schwer, dass er in seinem „Rückblick“ sogar von einem „Canosagang“ sprach. Das Gespräch, es dürfte im Januar oder Februar 1920 stattgefunden haben, fand wider Erwarten in harmonischer Atmosphäre statt, denn auch Kaplan hatte gute Gründe, neuerlich mit Voith zu verhandeln: Einerseits waren in der Kaplan-Vereinigung alle namhaften deutschen Turbinenbauer vertreten, andererseits hatte Kaplan in Österreich noch keinen Lizenznehmer. Das erste Resultat war ein Lizenzvertrag für Österreich mit Voith St. Pölten. Für Deutschland war dies zum Missfallen Walther Voiths nicht möglich, da Voiths Rechte von der Kaplan-Vereinigung wahrgenommen wurden. Es folgten schwierige Verhandlungen zwischen der Vereinigung – jetzt erweitert um Piccard-Pictet & Cie (Genf), Escher, Wyss & Cie (Ravensburg), J. M. Voith St. Pölten – und Kaplan, bevor der Lizenzvertrag mit der Kaplan-Vereinigung im März 1920 in Kraft trat. Dass der Vertrag zustande kam, ist Walther Voith anzurechnen, pochten doch die anderen Mitglieder der Vereinigung darauf, dass Kaplan seine Verpflichtungen aus dem bereits bestehenden Optionsvertrag nicht eingehalten hatte: Über Weiterentwicklungen hatte er trotz Verpflichtung aus dem Vertrag die Vereinigung nicht informiert, wohl aber öffentliche Vorträge darüber gehalten. Gleichzeitig mit dem Lizenzvertrag wurde auch der Vertrag des Kaplan-Turbinen-Konzerns zwischen den Firmen der Kaplan-Vereinigung (mit Sitz in Berlin) abgeschlossen.

Für Österreich und angrenzende Länder wurde der Lizenzvertrag mit Voith St. Pölten am 12. März bzw. 14. April 1920 abgeschlossen. Voith St. Pölten vereinbarte mit einem Kooperationsvertrag am 10. Mai 1920 zudem eine vertiefende Zusammenarbeit für die Tschechoslowakei mit der Maschinenfabrik Storek.

Die Vertragserfüllung Viktor Kaplans war allerdings schleppend – die von ihm versprochene



**Bild 4:** Erste Voith-Kaplan-Turbine Siebenbrunn 1922

dreidimensionale Turbinentheorie lieferte er nur in Ausschnitten. Erst 1921 erhielt Voith St. Pölten als Lizenznehmer Zeichnungen und Schaufelpläne eines Laufrades mit vier Schaufeln, die nun im Gegensatz zum Rad von 1916 verstellbar waren. Die Versuche wurden wiederum in Hermaringen durch Hans Faic Canaan gefahren und als Erfolg gewertet (**Bild 3**). Die von Kaplan in Brünn durchgeführten Versuche für den Kaplan-Konzern wiesen die versprochenen technischen Garantien nach, jedoch wurde die Versuchsdurchführung und Versuchsgenauigkeit vom Kaplan-Konzern angezweifelt. Man kam zu dem Schluss, Kaplan sei nicht imstande, bindende Garantien abzugeben und das erforderliche Konstruktionsmaterial rechtzeitig zu liefern. Escher-Wyss schlug schließlich ein Schiedsgericht vor, an dem sich Storek beteiligen wollte, da Storek nach sechs Jahren Vertragslaufzeit noch keine zuverlässigen Grundlagen von Kaplan hatte, dafür jedoch ein Verlust von 2 bis 3 Mio. Kronen entstanden war. Am 21. Oktober 1921 tagte das Schiedsgericht, zu dem Storek jedoch nicht erschien. Die Verhandlung endete mit einem Kompromiss: Kaplan musste seine dreidimensionale Turbinentheorie endgültig liefern, die Lizenzzahlungen jedoch wurden bis dahin ausgesetzt.

Walther Voith hingegen war nach den Versuchen in Hermaringen zur Auffassung gelangt, es sei höchste Zeit, die Kaplan-Turbine auf den Markt zu bringen, und zwar im Alleingang. Gleichzeitig wollte er sich von der Abhängigkeit

Kaplans lösen. Für das Projekt Siebenbrunn in Österreich ließ er daher ein eigenes Laufrad entwickeln, das das nunmehr bekannte Phänomen der Kavitation bereits berücksichtigte. Die theoretische Grundlage für die Auslegung lieferte eine bereits 1920 in der VDI-Zeitschrift veröffentlichte

Methode zur Berechnung von Kaplan-Turbinen von Prof. Bauersfeld. Obwohl Walther Voith die Kaplan-Turbine unbedingt realisiert haben wollte, zögerte er als Erstprojekt eine so große Maschine wie die 1 100-PS-Turbine für das Kraftwerk Siebenbrunn zu bauen. Es ist dem Werksdirektor von St. Pölten, Hans Wiedmann, zuzuschreiben, dass er Walther Voith dennoch überzeugen konnte. 1922 wurden die ersten beiden Kaplan-Turbinen von Voith (Turbinennummer 7 721 und 7 722) in der Papierfabrik Steyrermühl in Siebenbrunn in Österreich in Betrieb gesetzt. **(Bild 4)** Die technischen Daten lauten: Laufraddurchmesser 1,9 m, Auslegungsdurchfluss 16,4 m<sup>3</sup>/s, max. Leistung 1 100 PS, max. Wirkungsgrad 87,5 %, bei 1/3 Teillast 80 %. Die Verstellung der Schaufeln erfolgt mechanisch über eine Muffe; hydraulischer Entwurf und Konstruktion erfolgten in Heidenheim, die Fertigung in St. Pölten. Laufende Überprüfungen zeigten die Zuverlässigkeit der Konstruktion – damit war bei Voith der Weg frei für die Kaplan-Turbine.

Aufgrund der historischen Bedeutung dieses ersten Auftrages sollen die für die Entwicklung der Kaplan-Turbine wichtigsten Personen bei



**Bild 5:** a) Walther Voith; b) Hans Wiedmann; c) Hans Faic Canaan

Voith genannt werden:

In St. Pölten:

- Walther Voith (**Bild 5a**) als Motor und Antrieb;
- Hans Wiedmann (**Bild 5b**), Technischer Direktor des Werkes St. Pölten und Befürworter des Auftrags Siebenbrunn.

In Heidenheim:

- Hans Faic Canaan (**Bild 5c**), der Versuchsingenieur und Hydrauliker;
- Carlos Schmitthenner (**Bild 5d**), Leiter der Turbinenkonstruktion, Konstrukteur des Laufrades mit Schaufelverstellmechanismus, Festlegung des noch heute gültigen Prinzips Hebel – Lenker – Regelkreuz;
- Rudolf Kiderlen (**Bild 5e**), Gesamtkonstruktion der Turbine,
- Max Rudert (**Bild 5f**), Bürovorstand Niederdruckturbinen.

Lechner [3] schrieb in seiner Kaplan-Biographie über die Kaplan-Turbine Siebenbrunn: „Damit hatte auch die Konzernfirma Voith den Bau von Kaplan turbinen aufgenommen. Jetzt sollte der Siegeszug der Kaplan turbine bald einsetzen.“

Für Viktor Kaplan waren die schwierigen Jahre jedoch noch nicht zu Ende. Kurz vor Ende der Einspruchsfrist des deutschen Patentes reichten die Firma Schichau aus Westpreußen und Prof. Dr. Franz Lawaczek aus Bayern Nichtigkeitsklagen gegen das Kaplan-Patent ein. Erst 1925, in einem Schlussprozess am Reichsgericht in Leipzig, wurde Kaplan das Patent vollkommen zugesprochen. Da die Firmen des Kaplan-Konzernes seit 1920 Lizenznehmer waren, unterstützten sie Kaplan bei diesen Patentstreitigkeiten und waren bei der „Siegesfeier“ am Tag nach der Gerichtsverhandlung auch anwesend [4].

## 5 Das Verhältnis Viktor Kaplan zur Kaplan-Vereinigung

Das Verhältnis zwischen Viktor Kaplan und den Firmen der Kaplan-Vereinigung wird als äußerst schwierig beschrieben, und das war es wohl auch. Sehr deutlich beschrieb Lechner [3] die Kluft zwischen Viktor Kaplan und den Firmen der Kaplan-Vereinigung – auf der einen Seite der vorwärtsdrängende, von seiner Erfindung überzeugte Techniker, auf der anderen eine nüchtern kalkulierende Großindustrie, die ihren Kunden funktio-

nierende Gewerke und Garantien abliefern wollte und musste. Das Schicksal anderer Erfinder vor Augen misstraute Kaplan den Firmen von Anfang an, enthüllte Details seiner Erfindung erst sehr spät und lieferte Entwürfe und theoretische Berechnungssätze nur spärlich und in kleinen Schritten. In seinem Brief vom 14.07.1913 (einen Monat bevor er das Patent für die verstellbare Laufschaufel anmeldete) schreibt Kaplan selbst an Voith in Heidenheim: „Sie kennen meinen berechtigten Standpunkt, der darin besteht, dass ich alles verhindern muss, was ein selbstständiges Arbeiten an der Kaplan turbine, ohne mein Zutun, ermöglichen könnte.“ Anfänglich beanspruchten die Firmen der Kaplan-Vereinigung das Patent Kaplans zum Teil vehement, selbst nach der Einigung mit Kaplan 1915 agierte die Kaplan-Vereinigung weiterhin zurückhaltend: Aufgrund der unzureichenden Messergebnisse mit dem von Kaplan konstruierten Propellerrad von 1916 (anstelle verstellbarer Laufschaufeln, wie er es bereits in Brünn getestet hatte) und den spärlich vorliegenden Unterlagen zögerte man, die Kaplan-Turbine in Lizenz in das Fertigungsprogramm aufzunehmen. Die Industrie forderte Details und Verbindlichkeit, die Kaplan nur langsam und unvollständig lieferte. Auch waren die Interessen der Firmen in der Kaplan-Vereinigung durchaus verschieden. Trotzdem anerkannte die Vereinigung das Kaplan-Patent, schloss 1920 ein Lizenzabkommen ab und wollte die Kaplan-Turbine rasch in das Produktionsprogramm aufnehmen. Stattdessen kam es 1921 sogar zum erwähnten Schiedsgerichtsverfahren.

In Schwung kam die Kaplan-Turbine erst, als sich die Firmen selbst anschickten, sie zu einem industriellen Produkt weiterzuentwickeln. Lechner [3] erwähnte in diesem Zusammenhang drei Namen: Storek in Brünn, wo man den Mut hatte, die erste Kaplan-Turbine zu bauen (1918 für die Börtel- und Strickgarnfabrik M. Hofbauers Witwe, Verwandte von Kaplans Frau Margarethe); Dr. Walther Voith in St. Pölten sowie die Herrn Molinder und Elov Englesson von Verkstad Kristinehamn in Schweden, die in der schwierigen Zeit der Rückschläge 1921 alle ihre „schützende Hand über Kaplan“ gehalten hatten: „Dass man sich bemühte, die sogenannten Kinderkrankheiten der Kaplan turbine zu beheben, ist ein unvergänglicher Verdienst der genannten Persönlichkeiten,





**Bild 5:** d) Carlos Schmitthenner; e) Rudolf Kiderlen; f) Max Rudert

dass es gelang dieselben zu beseitigen, ist ein Verdienst der tüchtigen Ingenieure dieser Betriebe.“

Letzten Endes waren es einzelne Persönlichkeiten, die der Kaplan-Turbine den Weg in die Welt öffneten. Für Voith war es Walther Voith, der große Erfolg der Kaplan-Turbine vertiefte die persönliche Freundschaft zwischen Viktor Kaplan und Walther Voith. Dies hielt nicht nur Walther Voith in seinem „Rückblick“ fest, bezeugt wird es auch durch die Eintragungen Walther und Hermann Voiths in Viktor Kaplans Gästebuch am Landsitz Rochuspoint am Attersee. Viktor Kaplan überreichte Walther Voith darüber hinaus einmal ein Exemplar einer technischen Veröffentlichung mit der schönen Widmung „Dem Finder meiner Erfindung“.



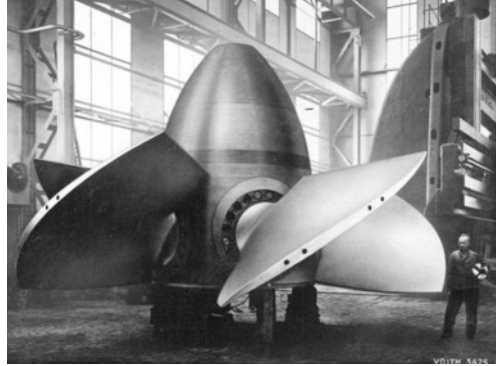


## 6 Die weitere Entwicklung bei Voith

Bereits 1925 waren 21 Kaplan-Turbinen von Voith ausgeliefert. Der Durchmesser wuchs auf 2,7 m, die Leistung auf 3 500 PS. Anlagenmessungen zeigten bereits einen Wirkungsgrad von 92,29 %. 1925 wurde auch für geringe Fallhöhen ein Dreiflügler entwickelt (KW Liebenstein,  $H = 2,35$  m, 187 U/min), 1926 wurde erstmals ein hydraulischer Servomotor am Ende der hohlgebohrten Welle eingesetzt. Im selben Jahr folgte das Donaukraftwerk Kachlet (Durchmesser der Propellerlaufräder 4,6 m, Maximalleistung 9 320 PS). 1928 entstand das Rheinkraftwerk Ryburg-Schwörstadt mit den damals größten Kaplan-Turbinen der Welt (vier Turbinen mit einer Maximalleistung von je 40 000 PS, einem Laufraddurchmesser von 7 m und einem Gewicht des Laufrades von 112 t; **Bild 6**). Gewonnen hatten diesen Auftrag eine Arbeitsgemeinschaft zwischen Voith, Escher Wyss und Charmilles aus der Schweiz. Voith lieferte die Hydraulik, die Konstruktion erfolgte gemeinsam. Die Lieferaufteilung war horizontal, wobei Voith die Laufräder beistellte, die im Werk in Heidenheim bearbeitet werden konnten. Die größeren Teile mussten bei Krupp zugekauft werden.

Innerhalb von nur sechs Jahren hatte sich die Kaplan-Turbine spätestens mit Ryburg-Schwörstadt für den Ausbau größter Flüsse weltweit durchgesetzt. Das führte bei Voith Heidenheim unter anderem zum Bau der Großturbinenhalle und der Bestellung der „Hercules“ genannten, mit einem Drehdurchmesser von 18 m damals größten Drehmaschine der Welt, um große Kaplan-Turbinen selbst fertigen zu können.

Zudem einigten sich Walther Voith und Viktor Kaplan auf eine Zusammenarbeit zur Auswertung der amerikanischen Patente Kaplans, mit denen dieser immer noch nicht weitergekommen war. Mehrere US-Firmen hatten Propeller-Turbinen ohne Lizenz gebaut. Walther Voith und Viktor Kaplan einigten sich auf eine Teilung der Lizenznahmen aus den USA und Kaplan übertrug die Rechte für die USA auf die Firma Voith, die 1927 einen Lizenzvertrag für Nordamerika mit Morgan Smith vereinbarte. Damit war die Basis für den Erfolg der Kaplan-Turbine auch für Nordamerika gelegt: Zwischen 1928 und 1939 verkaufte Morgan Smith mehr als 130 Kaplan-Turbinen aller Größen.



**Bild 6:** Laufrad Ryburg-Schwörstadt

## 7 Die Kaplan-Turbine bei Voith heute

Vertikale riesengroße Kaplan-Turbinen mit Durchmessern um 10 m, horizontale Kaplan-Turbinen wie direktgetriebene Rohrturbinen, Getriebetrohrturbinen, Kaplan-Pumpturbinen, 3- bis 8-Laufschaukel-Bauweisen etc. – die Kaplan-Turbine hat sich in zahlreichen Varianten beim Ausbau geringerer Fallhöhen und großer Durchflüsse durchgesetzt. Zahlreiche Modernisierungsprojekte von Francis-Anlagen aus den 1920er-Jahren zeugen von der Überlegenheit der Kaplan-Turbine. So baut Voith derzeit die im norwegischen Ranaasfoss 1922 installierte doppelflutige Francis-



**Bild 7:** Laufrad Saratov, Russland



**Bild 8:** a) Laufrad Ligga, Schweden;  
b) StreamDiver™



Maschinen auf Kaplan-Maschinen um, in Eglisau, Schweiz, wurden die 1921 am Rhein gebauten Francis-Turbinen kürzlich durch Kaplan-Turbinen ersetzt, und auch im Kraftwerk Pernegg, Österreich, wurden 2013 die 1927 errichteten Francis-Maschinen durch neue Kaplan-Turbinen ersetzt.

Nicht nur die erste Voith-Kaplan-Turbine wurde bei Voith in St. Pölten gebaut: passend zum 100-Jahr-Jubiläum des Kaplan-Patentes wird die größte je von Voith gefertigte Kaplan-Turbine zurzeit in St. Pölten hergestellt. Mit ihren 10,3 m Laufraddurchmesser wird sie der Modernisierung des Wolgaskraftwerks Saratov in Russland (**Bild 7**) mit 21 Einheiten dienen. Neue Technologien erlauben wassergefüllte Naben, wie für das Laufrad im Kraftwerk Ligga, Schweden (7,5 m Durchmes-

ser, 185 MW; **Bild 8a**), und eine patentierte, besondere Bauweise, wie jene für Bonneville, USA, reduziert die Mortalität der Fische beim Durchgang durch die Turbine. In Kostheim am Main wurden drehzahlvariable Kaplan-Turbinen mit einem speziellen drehzahlvariablen Voith-Getriebe eingebaut. Mit dem StreamDiver™ (**Bild 8b**) wurde außerdem eine vollökologische Kleinturbinen-Generatoreinheit in fett- und ölfreier Technologie realisiert.

Aus der Wasserkraft und dem Voith-Produktionsprogramm ist die Kaplan-Turbine heute nicht mehr wegzudenken. Viktor Kaplan hat mit seiner Turbine der Welt eine bahnbrechende Erfindung zur umweltfreundlichen, regenerativen Energieerzeugung geschenkt.

## Autoren

**Dr. techn. Leopold Heninger**

Voith Hydro GmbH & Co KG  
 Linzerstrasse 55  
 3100 St. Pölten, Österreich  
 leopold.heninger@voith.com

**Dr.-Ing. Dr. phil. Hermann Schweickert**

Steinstraße 5  
 89522 Heidenheim  
 hermann.schweickert@t-online.de

## Literatur

- [1] Müller, W.: Die Francis-Turbinen und die Entwicklung des modernen Turbinenbaues. Hannover: Verlag von Gebrüder Jänecke, 1901.
- [2] Schweickert, H.: Der Wasserturbinenbau bei Voith zwischen 1913 und 1939 und die Geschichte der Eingliederung neuer Strömungsmaschinen. Heidenheim: Verlag Uwe Siedentop. 2002.
- [3] Lechner, A.: Viktor Kaplan. Wien: Verlag von Julius Springer, 1936.
- [4] Gschwandtner, M.: Aurum ex Aquis. Dissertation Universität Salzburg. 2006.

Leopold Heninger and Hermann Schweickert

**Viktor Kaplan and his Turbine at Voith**

1913 Viktor Kaplan filed his patent but it needed till 1922 that Voith built its first Kaplan turbine. This paper reports about the relation between Viktor Kaplan and Voith introducing the Kaplan turbine to the hydro market and closes with an overview on some current Kaplan projects at Voith.

Леопольд Хенингер и Херманн Швайкерт

**Виктор Каплан и разработанная им турбина в истории компании «Фойт»**

В 1913 году Виктор Каплан подал заявку на получение патента на изобретение поворотнo-лопастной турбины. Спустя некоторое время, а именно в 1922 году, первая турбина Каплана была изготовлена на фирме «Фойт». В статье рассказывается об истории переменчивых отношений между Виктором Капланом и компанией «Фойт» в период внедрения поворотнo-лопастной турбины в сфере гидроэнергетики. В завершение представлен обзор реализуемых в настоящее время проектов компании «Фойт» с применением турбин Каплана.

Markus Schneeberger

# Gegenwart und Zukunft der Kaplan-Turbine bei Andritz Hydro

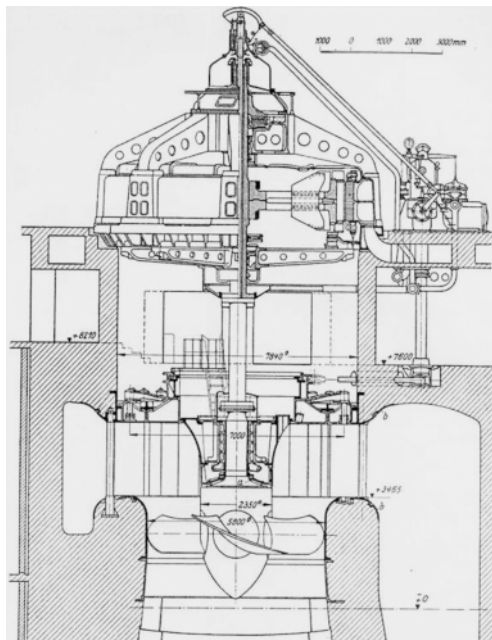
Andritz Hydro und die Kaplan-Turbine blicken auf eine fast hundertjährige gemeinsame Erfolgsgeschichte zurück. Noch heute basiert rund ein Viertel des Turbinengeschäfts auf Kaplan-Turbinen und jüngste Großprojekte sowie Modernisierungsaufträge für bestehende Anlagen zeugen von der ungebrochenen Attraktivität dieses Turbinentyps. Dank ihrer herausragenden Eigenschaften steht die Kaplan-Turbine aber auch stets für Innovation, sei es in der Entwicklung umweltfreundlicher Technologien („Green Kaplan“) oder im zukunftssträchtigen Bereich der Gezeitenenergie.

## 1 Die Anfänge

Die Kaplan-Turbine hat seit knapp hundert Jahren eine enorme Bedeutung für den Turbinenbau in unserem Unternehmen. Die heute unter dem einheitlichen Namen Andritz Hydro auftretende Gruppe blickt auf zahlreiche Vorgängergesellschaften zurück, zwei davon sind besonders stark

mit den Anfängen dieser für die Wasser- und Energiewirtschaft so bedeutungsvollen Erfindung verbunden. Während auf der einen Seite Escher Wyss als Teil des „Kaplan-Syndikats“ mit Viktor Kaplan in langwierigen Patentstreitigkeiten lag, ermöglichte ihm ein anderer Teil der heutigen Firmengruppe – KMW (Karlstads Mekaniska Werkstad) – den industriellen Durchbruch: die Anlage Lilla Edet in Schweden, erbaut im Jahr 1926, war die erste leistungsstarke Kaplan-Turbine der Welt. Mit einem Durchmesser von 5,8 m, einer Fallhöhe von 6,5 m und 11 200 PS Leistung und einem überlegenen Wirkungsgradverlauf zählt sie zu den historisch wichtigsten Referenzen von Andritz Hydro.

In späterer Folge gelang es an der Genialität der Erfindung voll mit zu partizipieren. Ein Blick in die Turbinenreferenzliste zeigt, dass mit über 4 400 installierten Einheiten etwa ein Viertel der von Andritz Hydro ausgelieferten Maschinen auf Kaplan-Turbinen basiert. Die in dieser Sicht wesentlichsten Anlagen stammen von Schweizer Standorten (der ehemaligen Gesellschaften Escher Wyss, Sulzer, Vevey oder Charmilles), aus Schweden (KMW, Nohab, Waplan), dem GE Hydro Bereich (General Electric, Boving, Tampella) und Österreich (Andritz, Voest-Alpine, MCE, VA TECH).



**Bild 1:** Krafthausschnitt Lilla Edet 1926, Schweden

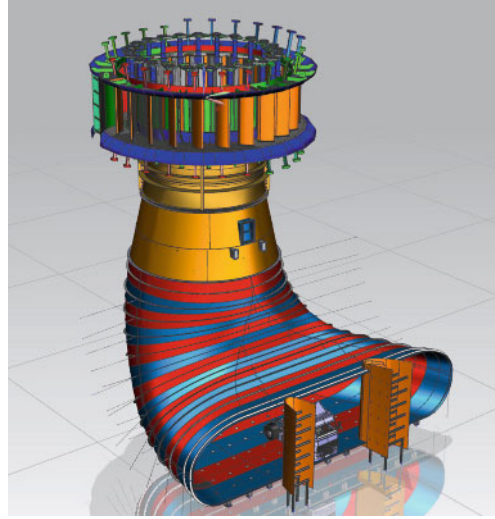
## 2 Die Gegenwart

Wie wesentlich dieser Maschinentyp auch heute noch für die Wasserkraft ist, sieht man an einem Blick in die aktuelle Auftragseingangsliste: Von Januar bis September 2013 gelangten bei Andritz Hydro Bestellungen von 30 Kaplan-Turbinen ein – von kleinen Maschinen mit einer Leistung von weniger als 1 MW bis hin zu Großanlagen mit knapp 200 MW pro Turbine.

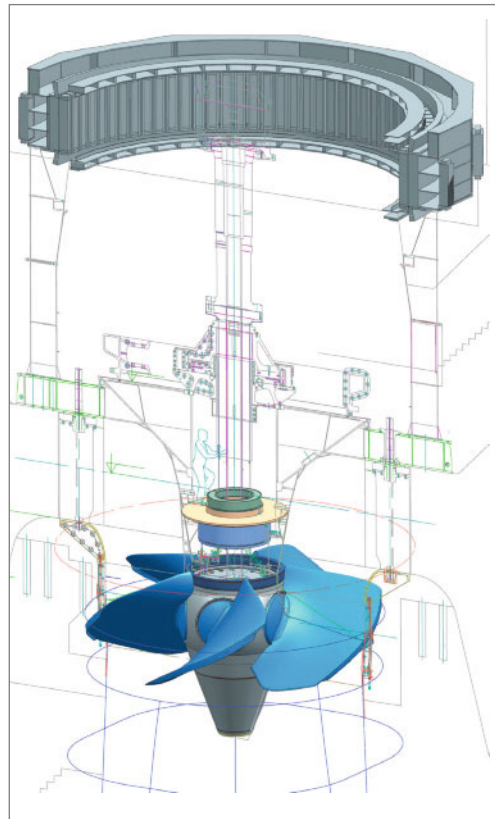
Am bemerkenswertesten ist, dass sich Kaplan-Turbinen in ihren Grundzügen in den vergangenen hundert Jahren nicht wesentlich verändert haben. Die Gestaltung des Einlaufs und der Spirale, des Stütz- und Leitapparats, des Laufrads und des Saugrohrs ist auf den ersten Blick nahezu unverändert zu den Anfangsjahren. Natürlich finden sich in modernen Kaplan-Turbinen jede Menge Optimierungen aller möglichen technischen Details, aber ein Vergleich des Maschinenschnitts von Lilla Edet (**Bild 1**) und einer ähnlich großen Anlage von heute würde zeigen, dass Viktor Kaplan selbst schon sehr früh die optimale Anordnung und die entsprechende funktionelle Gestaltung gefunden hat. Wenn man bedenkt, wie sehr sich etwa Telefone oder Flugzeuge in den letzten hundert Jahren verändert haben, ist Viktor Kaplan alleine aus diesem Umstand heraus größter Respekt für seine Erfindungen zu zollen.

Die drei interessantesten Kaplan-Turbinen-Projekte von Andritz Hydro sind derzeit Anlagen in Kanada, Laos und Österreich, auf die im Folgenden kurz eingegangen wird.

In Neufundland wird zurzeit ein großer Laufkraftwerkskomplex mit mehreren Anlagen errichtet. Die zwischen 2012 und 2017 zu errichtende Stufe Muskrat Falls wird aus vier großen Kaplan-Turbinen bestehen. Die Laufraddurchmesser betragen 8,8 m und die Nennfallhöhe 35 m. Die Nennleistung von 209 MW pro Turbine wird dazu führen, dass die Muskrat-Falls-Turbinen eine der leistungsstärksten Kaplan-Turbinen sein werden, die bisher gebaut wurden. Neben den Turbinen werden von Andritz Hydro auch alle vier Generatoren und umfangreiche Stahlwasserbauausrüstung mitgeliefert. Die Energie wird mit Hochspannungs-Gleichstromübertragung in die über 2 000 km weit entfernten Verbrauchszentren im südlichen Teil Kanadas geliefert.



**Bild 2:** CAD-Modell-Saugrohr und Stützschaukelring Xayaburi, Laos



**Bild 3:** Revitalisierung Ybbs, Österreich





**Bild 4:** Hydromatrix-Anlage Ashta, Albanien

2013 erfolgte der Auftragseingang für das Projekt Xayaburi in Laos. Der Lieferumfang umfasst hier 7 + 1 Maschinensätze sowie die komplette elektrische und mechanische Kraftwerksausrüstung, die gesamte Projektabwicklung dafür kommt aus Österreich. Die sieben großen Kaplan-Turbinen für das am Mekong gelegene Kraftwerk werden einen Laufraddurchmesser von 8,6 m aufweisen, für eine Nennfallhöhe von 28,5 m ausgelegt sein und über eine Nennleistung von je 175 MW verfügen. Zusätzlich wird noch eine weitere Maschine mit 6 m Laufraddurchmesser installiert. Die Fertigstellung des Projekts ist für 2017 geplant. Um sich einen Eindruck von der Größe der Bauteile einer solchen Maschine zu verschaffen, ist in **Bild 2** ein LKW in das 3-D-CAD-Modell des Saugrohres von Xayaburi eingebettet.

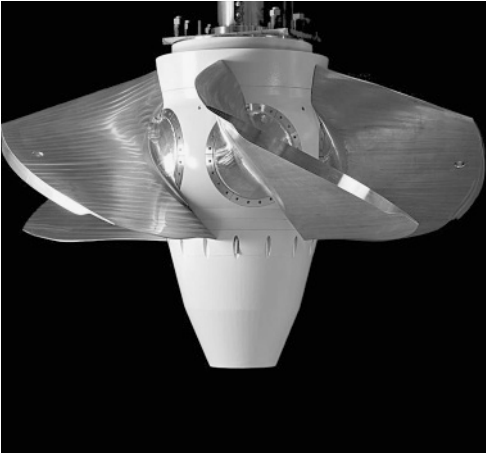
Bei den beiden zuvor genannten Projekten handelt es sich um Neuanlagen, aber auch der Umfang an Modernisierungen und Rehabilitierungen von Wasserkraftwerken mit Kaplan-Turbinen darf nicht unerwähnt bleiben. Als Beispiele hierfür seien die großen Revitalisierungsaufträge an der österreichischen Donau in Ybbs (2012, **Bild 3**) sowie Aschach (2005) genannt.

Solche Projekte beginnen zunächst mit Strömungssimulationen und Modellversuchen im hydraulischen Labor, um durch den Umbau die

Energieerzeugung der bestehenden Anlage zu optimieren. Je nach Ausgangslage sind hier beachtliche Leistungssteigerungen durch Erhöhung des Wirkungsgrades, des Durchflusses und der Kavitationsbeständigkeit möglich. Damit lassen sich Umbaukosten und Erzeugungsausfall während der De- und Wiedermontagephase als attraktive Investition für den Betreiber darstellen. Der typische Projektumfang beinhaltet neben den hydraulischen Untersuchungen dann Konstruktion, Fertigung, Montage und Inbetriebnahme der neuen Komponenten.

Besonders beeindruckend ist die Tatsache, dass diese Maschinen meist vierzig oder fünfzig Jahre und nur mit geringen Unterbrechungen erfolgreich in Betrieb waren. Die aufgelaufenen Betriebsstunden solcher Kaplan-Turbinen sind enorm und werden wohl von kaum einer anderen Branche im Maschinenbau übertroffen. Nicht zu vergessen sind die dabei erzeugte Elektrizität und die Erlöse, die diese Anlagen für ihre Betreiber erwirtschaftet haben.

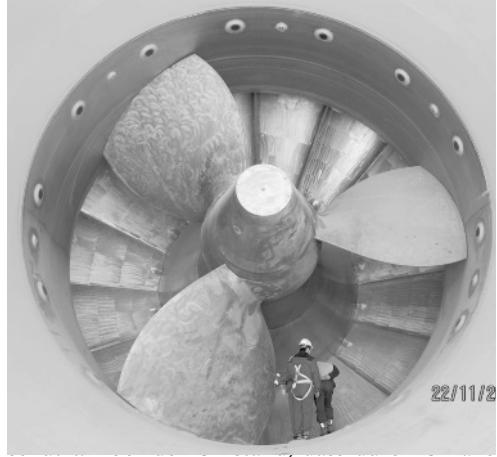
Die gegenwärtigen technischen Herausforderungen bei Kaplan-Turbinen betreffen zunächst zwei Bereiche. Einerseits gilt es den wirtschaftlich sinnvollen Anwendungsbereich zu erweitern, was bei Andritz Hydro etwa mit dem Hydromatrix-Konzept gelungen ist. Die Grundidee hierbei ist,



**Bild 5:** Ölfreie Kaplan-Turbine

statt nur wenigen großen Einheiten eine Vielzahl kleiner kompakter Turbinen zu liefern. Dadurch lassen sich die Gesamtkosten eines Wasserkraftwerks – vor allem bauseits – reduzieren. Zusätzlich werden heute verfügbare Technologien, wie etwa permanent-erregte Synchrongeneratoren eingesetzt, um robuste und kompakte Lösungen anbieten zu können. Aktuellstes Beispiel sind die zwischen 2009 und 2012 errichteten Anlagen Ashta 1 und 2 in Albanien mit 2 x 45 Turbinen und einem Laufraddurchmesser von 1,32 m (**Bild 4**).

Andererseits sind Innovationskraft und modernste Designmethoden auch aufgrund der Tatsache erforderlich, dass Kaplan-Turbinen heute nicht nur zur reinen Grundlast-Stromerzeugung eingesetzt werden, sondern auch zur verlustfreien Ausregelung der volatilen Netzeinspeisung anderer erneuerbarer Energieträger, wie Photovoltaik und Wind. Diese Netzstabilisierungsmaßnahme führt zu einer gänzlich anderen Betriebsart mit bis zu 50-fach häufigeren Stellvorgängen in der Turbine, was unweigerlich zu einer beachtlichen Ermüdungsbeanspruchung der Bauteile und zu vermehrtem Verschleiß an Lager- und Dichtungsstellen führt. Aber auch zu dieser Art der Netzdienstleistung ist die Kaplan-Turbine imstande. Um wieder ähnlich hohe Lebensdauern wie bisher zu erreichen, sind innovative Änderungen im Design und in den Berechnungsmethoden erforderlich. Den Betreibern ermöglicht diese Betriebsart außerdem zusätzliche Erlöse.



**Bild 6:** Laufrad des Gezeitenkraftwerks Sihwa, Südkorea

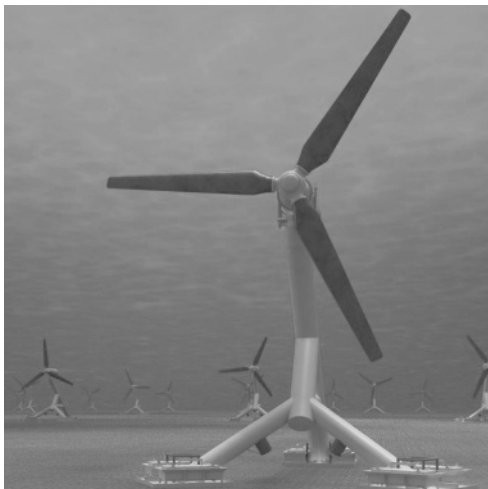
oder mangelnde Wartung jenes Nabenöl ins Flusswasser austreten könnte, führte zur Entwicklung sogenannter ölfreier Naben oder der „Green Kaplan Technology“. In diesem Fall werden die Laufradnaben statt mit Öl mit Wasser gefüllt, somit ist auch bei etwaigen Leckagen eine Gefährdung des Flusswassers ausgeschlossen. Die Lagerschmierung muss nun durch sogenannte selbstschmierende wartungsfreie Lagerbüchsen erfolgen und Korrosion im Laufradinneren durch andere Maßnahmen – wie etwa die Verwendung von rostfreien Stählen und Korrosionsinhibitoren – vermieden werden (**Bild 5**).

Mittlerweile hat Andritz Hydro über 100 größere ölfreie Kaplanmaschinen mit einer Leistung von mehr als 5 MW geliefert. Es liegen verlässliche Betriebserfahrungen von Maschinen bis zu 7,5 m Laufraddurchmesser und einer Leistung von 85 MW vor. Auch die Xayaburi-Laufräder werden in ölfreier Ausführung geliefert werden und einen neuen Meilenstein bei den Referenzen für „Green Kaplan Technology“ setzen. Ansonsten erfolgt die Anwendung dieser Technologie in Märkten, wo dies vom Gesetz her vorgeschrieben ist (Skandinavien, Schottland, Australien) oder wo Kunden aus umwelttechnischen Gründen diese Lösung bevorzugen (Osteuropa).

Der zweite neue Anwendungsbereich von Kaplan-Turbinen ist der Einsatz in Gezeitenkraftwerken. Hier bietet sich zunächst die klassische Bauform an, wo an einem Damm die durch Gezeiten zustande gekommene Fallhöhe zwischen einem



**Bild 7:** Gezeitenströmungsturbine HS 1 000, Orkney (oben und links)

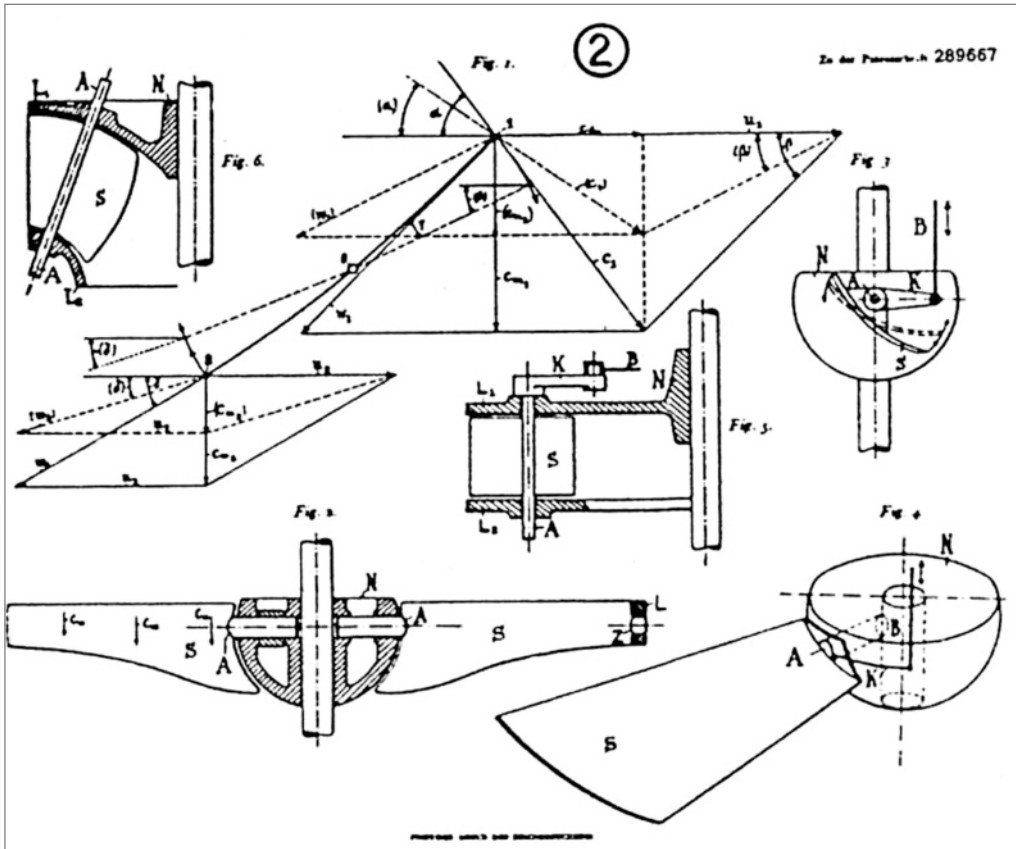


viele Quadratkilometer großen Reservoir und dem Meer genutzt werden. Die stolzeste Referenz von Andritz Hydro ist Sihwa in Südkorea, das nunmehr größte Gezeitenkraftwerk der Welt. Sihwa wurde 2011 in Betrieb genommen und mit 10 Kaplan-Rohrturbinen mit einem Laufraddurchmesser von 7,5 m und einer Nennleistung von 26 MW je Maschine ausgestattet (**Bild 6**). Zusätzlich zu den Anforderungen wie in einem Flusskraftwerk sind bei einem Gezeitenkraftwerk noch weitere technische Herausforderungen zu beachten, wie etwa ein Rückwärtsbetrieb und die erforderliche Seewasserbeständigkeit.

Die zweite Möglichkeit, die unerschöpfliche Kraft der Gezeitenenergie zu nutzen, liegt in der Nutzung der Gezeitenströmung. An manchen Stellen des Meeres kann die Fließgeschwindigkeit dieser Strömungen weit über der von Flüssen liegen. Hierzu werden Maschinen eingesetzt die einer Unterwasserwindturbine durchaus ähnlich sind (**Bild 7**).

Auch auf diesem Gebiet hat Andritz Hydro seit Dezember 2011 eine Prototypmaschine auf den Orkney Inseln erfolgreich in Betrieb. Die 1-MW-Turbine mit einem Laufraddurchmesser von 21 m verfügt ähnlich wie Windanlagen über ein dreiflügeliges Laufrad, dessen drehbare Flügel je nach den Strömungsbedingungen optimal angestellt werden – exakt wie in der 1913 festgehaltenen Patentschrift von Viktor Kaplan.

Wenn man die Zeichnungen in Kaplans Patentschrift genau ansieht, erkennt man, dass die von ihm skizzierte Flügel- und Nabenform (**Bild 8**) eine nahezu erstaunliche Ähnlichkeit mit der Technologie der modernsten Gezeitenströmungsturbinen hat – und das 100 Jahre später! Dies zeigt, wie exakt Viktor Kaplan seine Erfindung bereits berechnen und wie genau er auch die möglichen Bauformen der Zukunft voraussehen konnte.



**Bild 8:** Zeichnung der Laufschaufelverstellung, Patentschrift Viktor Kaplan

Nur bei ganz wenigen Erfindern kann man sagen, dass ihre Ideen trotz allem technischen Fortschritt auch hundert Jahre später noch in so ähnlicher Weise verwendet werden. Dieser Umstand beweist den enormen Weitblick und die Genialität Viktor Kaplans, der nicht nur den Geistesblitz einer großartigen Erfindung hatte, sondern auch über eine präzise Methodik verfügte, die ihm sehr früh ermöglichte, voll und ganz zu verstehen, wie diese schnellläufigen Turbinen mit den drehbaren Schaufeln auszusehen hatten um ihre optimale Wirkung zu entfalten.

## Autor

**Dipl.-Ing. Markus Schneeberger**

Andritz Hydro GmbH  
Lunzerstrasse 78  
4031 Linz, Österreich  
markus.schneeberger@andritz.com

Markus Schneeberger

### **Present and Future of Kaplan Turbines at Andritz Hydro**

The successful story of Kaplan turbines started almost hundred years ago and their significance for hydroelectric power plants cannot be denied. At Andritz Hydro, about 25 % of the supplied references are Kaplan turbines. The constant demand for this turbine type for recent large projects as well as for maintenance and rehabilitation projects shows that Kaplan turbines are still the perfect solution. Thanks to their outstanding characteristics Kaplan turbines have always been the key for innovative ideas. Clean technologies ("Green Kaplan") have been developed and Kaplan-type turbines will be the key for future technologies to generate electricity from tidal energy.

Маркус Шнеебергер

### **Современность и будущее турбины Каплана в компании «Andritz Hydro»**

Компания «Andritz Hydro» и турбина Каплана – оглядываясь на прошлое, можно говорить о почти столетней истории успешного сотрудничества. Сегодня примерно четверть продукции в турбостроительной отрасли составляют турбины Каплана. Самые последние крупные проекты и заказы на модернизацию уже существующих установок свидетельствуют о неослабевающей привлекательности турбин этого типа. Благодаря своим уникальным качествам турбина Каплана всегда означает инновационность, будь то развитие экологически чистых технологий («Green Kaplan/Зеленый Каплан») или перспективная область приливной энергии.



Michal Kotoul

# Viktor Kaplan und sein in Brünn geschaffenes Werk

Der Aufsatz erinnert den wichtigsten Teil des beruflichen Lebens von Viktor Kaplan, das er vom Jahr 1901 bis 1931 in Brünn verbrachte – die Periode ist charakterisiert von einer stürmischen Entwicklung der wissenschaftlichen Kenntnisse zum Strömungsverhalten von Flüssigkeiten, der Entwicklung der angewandten Hydromechanik und des Baus von hydraulischen Strömungsmaschinen. Zwei Persönlichkeiten, die in Brünn arbeiteten und stark Viktor Kaplan unterstützten, sind gleichfalls dargestellt – Prof. Ing. Leopold Grimm, Professor an der Tschechischen Technischen Hochschule in Brünn, und Ing. Jaroslav Slavík, der Schüler und später der Assistent von Prof. Kaplan.

## 1 Einleitung

Die Jahre von 1901 bis 1934 standen im Zeichen einer stürmischen Entwicklung der wissenschaftlichen Kenntnisse zum Strömungsverhalten von Flüssigkeiten, der Entwicklung der angewandten Hydromechanik und des Baus von hydraulischen Strömungsmaschinen wie Pumpen und Turbinen. Die Vielzahl der gewonnenen Erkenntnisse auf der einen Seite und die Bedürfnisse der Praxis durch den Aufschwung der industriellen Produktion auf der anderen Seite beeinflussten auch die Struktur der Lehre an den Hochschulen. Es wurden neue Lehrstühle eingerichtet, die auf Hydromechanik und Wasserkraftanlagen spezialisiert waren.

Und so entstand bereits im Jahr 1901, ganze zwei Jahre nach Gründung der Tschechischen Technischen Hochschule Brünn (1899), der Lehrstuhl für Maschinenbau I, und zum ordentlichen Professor wurde Ing. Leopold Grimm vorgeschlagen, der das Institut bis 1932 leitete.

Die Forschung war nicht nur auf die Tschechische Technische Hochschule konzentriert. Zum Zeitpunkt ihrer Gründung bestand bereits seit 50 Jahren die Deutsche Technische Hochschule in Brünn, zu deren ordentlichem Assistent im Jahr 1903 Ing. Viktor Kaplan wird. Professor Grimm, der sich gleichfalls mit der Erforschung von Wasserturbinen befasste und unabhängig in Brünn wirkte, förderte die Arbeit von Professor Kaplan in außerordentlicher Weise. In Anbetracht seiner wichtigen Rolle, die er bei der Verteidigung der

Gedanken Kaplans spielte, erscheint es angebracht, auch Professor Grimm kurz vorzustellen.

## 2 Prof. Ing. Leopold Grimm (1862 bis 1939)

Nach seinem Studium und einer Assistentenstelle am Züricher Technikum erwarb Leopold Grimm

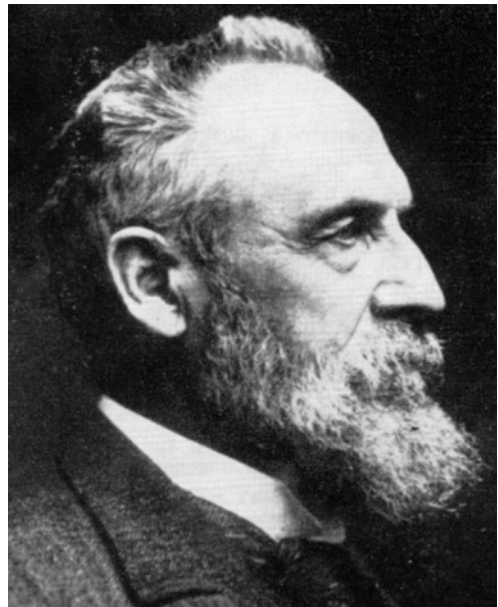


Bild 1: Prof. Ing. Leopold Grimm [1]

sich ausgezeichnete Fachkenntnisse bei den Maschinenfabriken Escher, Wyss und Cie. in Zürich, Franco Tossi in Legnano sowie J. M. Voith in Heidenheim, wo er leitende Positionen innehatte (**Bild 1**). An die Tschechische Technische Hochschule wurde er 1901 als ordentlicher Professor berufen. Im Studienjahr 1907 bis 1908 war er Rektor dieser Schule. Dreimal war er Dekan des Fachbereichs Maschinenbau und Elektrotechnik. Er war ein herausragender Experte im Bereich Wasserturbinen und Pumpen sowie in der Wasserwirtschaft.

Professor Grimm propagierte eine moderne Nutzung der Wasserkraft sowohl in Mühlen als auch in großen Kraftwerken und trieb sie aktiv voran. Dabei arbeitete er mit dem Werk in Blansko (heute ČKD) zusammen, für das er Turbinenlaufräder konstruierte, wodurch er damals einen entscheidenden Einfluss auf die Errichtung von Wasserturbinenwerken in Böhmen und Mähren gewann. Auch die Kraftwerke Střekov und Ladce stammen noch aus seiner Feder.

Professor Grimm setzte sich für die Umsetzung von Kaplans Gedanken ein und empfahl 1917 in einem Gutachten die Erprobung einer Kaplan-Turbine: „... die Kaplan'sche Sache hat zweifellos auch nach Abzug der Extremwerte der spezifischen Drehzahl und des Wirkungsgrads einen großen Wert und eine große Bedeutung, wovon am besten die unparteiisch ermittelten Ergebnisse

von Bremsversuchen an einer genau nach den Angaben des Autors ausgeführten Kaplan-Turbine mit einem größeren Durchmesser, z. B. 700 bis 1 000 mm, zeugen würden.“

Professor Grimm richtete für Unterrichts- und Forschungszwecke ein vorbildliches Labor für Wasserkraftmaschinen ein, das damals als bestes Labor seiner Art in der Tschechoslowakei galt.

### 3 Prof. Dr.-Ing. Viktor Kaplan (1876 bis 1934)

Viktor Kaplan (**Bild 2**) studierte Maschinenbau an der Technischen Hochschule Wien, wo er 1900 den Titel des Maschineningenieurs erlangte.

Im Jahr 1901 arbeitete er bei der Firma Ganz in Leobersdorf, die auf den Bau von Dieselmotoren spezialisiert war. Hier stellte er erstmals seine Kreativität und seinen technischen Weitblick unter Beweis, als er einen neuen Motor konstruierte. Seine Ideen fanden jedoch keinen Anklang, so dass er die Firma enttäuscht verließ.

Seine Genugtuung suchte er in der Einreichung seiner Dissertationsschrift bei der Hochschule in Wien über einen Verbrennungsmotor mit Einspritzung. Die Arbeit wurde jedoch nicht angenommen, und Kaplan begriff, dass er seine weitere Tätigkeit auf eine konsequente Synthese von Theorie und Praxis gründen muss.

Die Kreativität des jungen Ingenieurs entdeckte jedoch bald Professor Alfred Musil von der Deutschen Technischen Hochschule in Brünn, der Kaplan die Stelle eines Konstrukteurs am Lehrstuhl für Maschinenbau und Kinematik anbot. Hier nahm Kaplan seine Arbeit auf, unter anderem an seiner Erfindung einer Wasserturbine mit verstellbaren Schaufeln an Leit- und Laufrad. Er war sehr aktiv und fand die Unterstützung seiner Kollegen. Er publizierte eine Vielzahl theoretischer Abhandlungen und meldete die ersten Patente an, wovon das wichtigste aus dem Jahr 1913 eine Wasserturbine mit verstellbaren Schaufeln für relativ geringe Fallhöhen und große Durchflüsse betrifft.

Die Freude über den Erfolg währte jedoch nur kurz, denn umgehend rüsteten sich die großen Turbinenbauer vor allem aus Deutschland, der Schweiz und Schweden zum Angriff, die ihr Geld in die Entwicklung und Produktion der Francis-Turbine investiert hatten. In den zermürbenden



**Bild 2:** Prof. Dr.-Ing. Viktor Kaplan [2]

Patentstreitigkeiten um die Anerkennung des Vorrangs der Erfindungen fand Professor Kaplan eine große Stütze in seinem Schüler und späteren ersten Assistenten Ing. Jaroslav Slavík.

Durch den Ersten Weltkrieg und die Patentstreitigkeiten verzögerte sich die erste praktische Umsetzung von Kaplans Erfindung bis ins Jahr 1918, als die Brünnner Maschinenfabrik und Eisengießerei Ignác Storek die erste Kaplan-Turbine für eine Spinnerei im niederösterreichischen Velm produzierte (**Bild 3**). Den Versuchsbetrieb dieser Turbine eröffnete Professor Arthur Budau vom Wiener Technikum. Eine weitere Versuchsturbine nach System Kaplan, von Storek gemeinsam mit der Ersten Böhmischem-Mährischen Maschinenfabrik in Prag hergestellt, wurde 1921 im Kraftwerk Poděbrady installiert. Kurz darauf wurden Lizenzverträge über den Bau von Kaplan-Turbinen mit den im internationalen Kaplan-Turbinenkonzern vereinigten Firmen geschlossen.

Die hohe Arbeitsbelastung und der lang anhaltende Kampf um die Anerkennung seiner Erfindungen führten bei Professor Kaplan Anfang 1922 zum Ausbruch einer langjährigen Nervenerkrankung. Um alle Patentstreitigkeiten musste sich

fortan Ing. Jaroslav Slavík kümmern, Kaplans selbstloser Mitarbeiter und späterer Freund, dem der Erfinder uneingeschränkt vertraute. Welchen Anteil Slavík an der Schaffung der Kaplan-Turbine hatte, wird wohl kaum mehr zu klären sein. Sicher ist jedoch, dass er bei ihrer Entwicklung und praktischen Erprobung stets dabei war. Jaroslav Slavík hat es sich ganz sicher verdient, in diesem Text nicht übergangen zu werden.

Er wurde am 28. November 1895 in Wien als Sohn tschechischer Eltern geboren. Nachdem er 1913 die Realschule abgeschlossen hatte, zog die ganze Familie nach Brünn, wo Jaroslav Slavík am Deutschen Technikum ein Maschinenbaustudium aufnahm. Dort begegnete er Professor Kaplan, der ihn Anfang 1914 als Helfer für die Erstellung der Zeichnungen zu den Patentanträgen anstellte, später auch zur Zusammenarbeit bei den Modellen. Sowohl das Hochschulstudium Slavíks als auch seine Tätigkeit für Professor Kaplan wurde durch den Ersten Weltkrieg unterbrochen. Die Jahre 1916 bis 1918 verbrachte er an der italienischen Front. Nach dem Krieg bot ihm Professor Kaplan die Stelle einer wissenschaftlichen Hilfskraft am Lehrstuhl für Wasserturbinen an, nach



**Bild 3:** Patenturkunde und Abbildung der weltweit ersten Kaplan-Turbine, die am 24. März 1919 dem Betrieb übergeben wurde [1]

Ablegung der zweiten Staatsprüfung wurde er zum ordentlichen Assistenten. Ing. Jaroslav Slavík war nicht nur Mitarbeiter Professor Kaplans, sondern später, bis zu dessen Tod im Jahr 1934, auch Kaplans Patentverwalter. Entsprechend dem in Kaplans Testament ausgedrückten Wunsch leitete Slavík auch nach seinem Tod die schwierigen fachlichen Angelegenheiten im Zusammenhang mit dem Patentschutz der Kaplan-Turbine.

Um 1922 trat bei den von Storek gelieferten Turbinen ein Kavitationsproblem auf. Turbinen mit großer Ansaughöhe und hoher spezifischer Drehzahl erreichten nicht die vorgesehenen Parameter, sie fielen durch hohe Lärmentwicklung auf, und die Arbeitsflächen nutzten sich schnell ab. In Zusammenarbeit mit einem Team aus Mitarbeitern der Lizenznehmer, insbesondere der Mekaniska Verkstad aus dem schwedischen Kristinehamn, bekam Svavík schließlich jedoch auch diese kritische Situation in den Griff. Insgesamt reichte Professor Kaplan für seine Erfindungen mehr als 280 Patentanmeldungen in 27 Ländern ein.

Mit den neuen Kaplan-Turbinen wurden in der Folge zahlreiche Wasserkraftwerke ausgerüstet, so etwa in Loučná, Rapotín, Kroměříž, im italienischen Gorizia oder im schwedischen Lilla Edet.

Im Jahr 1926 verlieh die Technische Hochschule Prag Professor Kaplan in Anerkennung seines Werks die Ehrendoktorwürde der technischen

Wissenschaften. Kaplans Erfindungen führten nicht allein zur Konstruktion eines neuen Turbinentyps, sondern auch zu Verbesserungen bei den Testmethoden unter Verwendung von Modellturbinen, zu neuen Entwicklungen in der Metallurgie, bei der Kavitäts- und Strömungsforschung oder bei der Festigkeitsberechnung.

Im Jahr 1931 bat Professor Kaplan um Entbindung von seinen Tätigkeiten an der Hochschule und zog sich auf seinen Landsitz Rochuspoint im oberösterreichischen Salzkammergut zurück, wo er sich eine eigene Werkstatt und ein kleines Kraftwerk einrichtete. Hier verstarb er auch am 23. August 1934, kurz nachdem ihn das Brünner Technikum zum Ehrendoktor der technischen Wissenschaften ernannt hatte.

#### 4 Abteilung für Fluid-Engineering Viktor Kaplan an der Technischen Universität Brunn

Anlässlich des 120. Geburtstags Viktor Kaplans fand am 23. November 1996 an der Maschinenbaufakultät der Technischen Universität Brunn ein Festakt statt, in dessen Rahmen die Abteilung für hydraulische Maschinen in die Abteilung für Fluid-Engineering Viktor Kaplan umbenannt wurde. An der Feier nahmen auch einige Nachfahren und Verwandte Professor Kaplans teil, die aus Österreich und Deutschland angereist waren. Seine Ansprache hielt der damalige Dekan der Maschinenbaufakultät, Prof. Jan Vrbka, mit Rücksicht auf die Gäste auf Deutsch. Professor Vrbka beantwortete die Fragen der ausländischen Gäste, von denen die Enkelin Viktor Kaplans, Prof. Dr. Gerlind Weber von der Universität für Bodenkultur Wien, eine Dankesrede hielt. Anschließend warfen die Teilnehmer der Feier vom Dach der Maschinenbaufakultät aus einen Blick über die Stadt (**Bild 4**) und bekamen einen vom österreichischen Fernsehen gedrehten Film über das Wirken Professor Kaplans in Brunn gezeigt.

##### Danksagung

Dieser Artikel entstand in enger Zusammenarbeit mit Prof. František Pochylý, dem gegenwärtigen Leiter der Abteilung für Fluid-Engineering Viktor Kaplan.



**Bild 4:** Die ausländischen Gäste in Begleitung des Dekans der Maschinenbaufakultät, Prof. Jan Vrbka [1]

## Autor

**Prof. RNDr. Michal Kotoul, Dr. Sc.**

Technische Universität Brünn

Antonínská 1

601 90 Brno, Tschechien

Kotoul@fme.vutbr.cz

## Literatur

[1] Archiv der Technischen Universität Brünn.

[2] NN: Viktor Kaplan ([http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Viktor\\_Kaplan01.jpg](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Viktor_Kaplan01.jpg); Aufruf: 16.02.2014).

Michal Kotoul

### **Viktor Kaplan and his Great Work in Brno**

The paper reminds the most important part of Viktor Kaplan's professional life, which he spent in the city of Brno, dating from 1901 to 1931 – the period characterized by an unprecedented development of applied hydromechanics and construction of hydro machinery. Also two personalities who worked in Brno and strongly supported Viktor Kaplan are brought to attention – Prof. Ing. Leopold Grimm, professor of Czech Technical University in Brno, and Kaplan's student and first assistant Ing. Jaroslav Slavík.

Михал Котоул

### **Виктор Каплан и турбина, созданная им в Брно**

Авторы статьи напоминают о самом важном периоде профессиональной жизни Виктора Каплана (с 1901 по 1931 год), проведенном им в городе Брно. То время было отмечено бурным развитием научных знаний в такой области как гидравлические характеристики течения; появилось много новых разработок в сфере прикладной гидромеханики и конструирования гидравлических установок. В статье также рассказывается о двух работавших в Брно и оказывавших Виктору Каплану большую поддержку людей. Это инженер Леопольд Гримм, профессор Чешского Технического института в Брно и инженер Ярослав Славик, ученик и позднее ассистент профессора Каплана.



Wasserkraftprojekte Band II  
Ausgewählte Beiträge aus der Fachzeitschrift  
WasserWirtschaft  
Heimerl, S. (Hrsg.)  
2015, XI, 530 S. 347 Abb., 116 Abb. in Farbe.,  
ISBN: 978-3-658-07729-7