

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 Kreiselmachines 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 Re-

alschule von 1895 bis 1900 Maschinenbau studierte und anschließend seinen einjährigen Militärdienst bei der Kriegsmarine versah. Ab 1903 verbrachte Kaplan (**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.

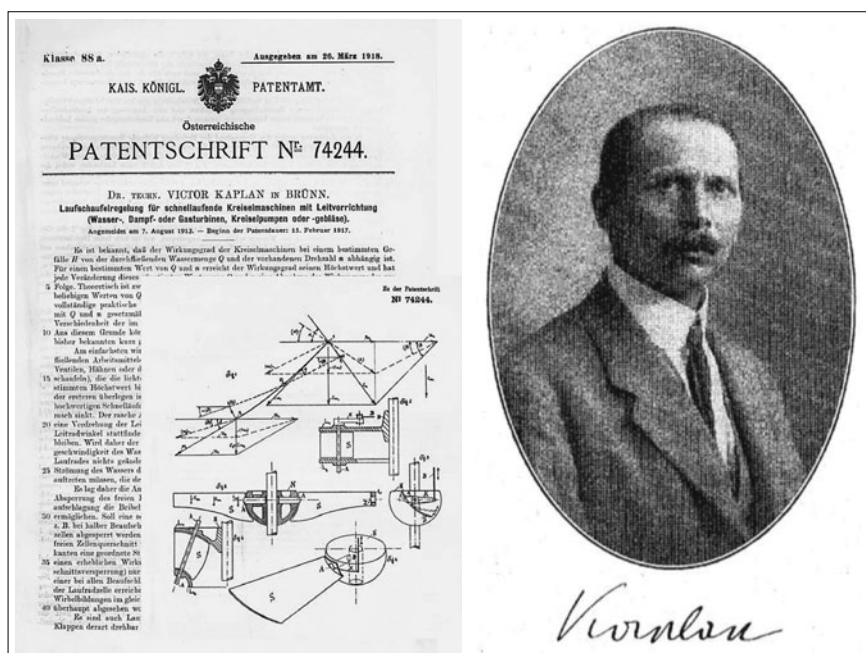


Bild 1: a) Patentschrift Viktor Kaplans von 1913; b) Viktor Kaplan

2 Die Bedeutung der Kaplan-Turbine

Die Kaplan-Turbine stellt eine der drei Hauptbauarten der Turbinenbranche dar



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

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 typi-

schen 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 Schnellläufigkeit 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 verstellbarer Beschauflung 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 be-

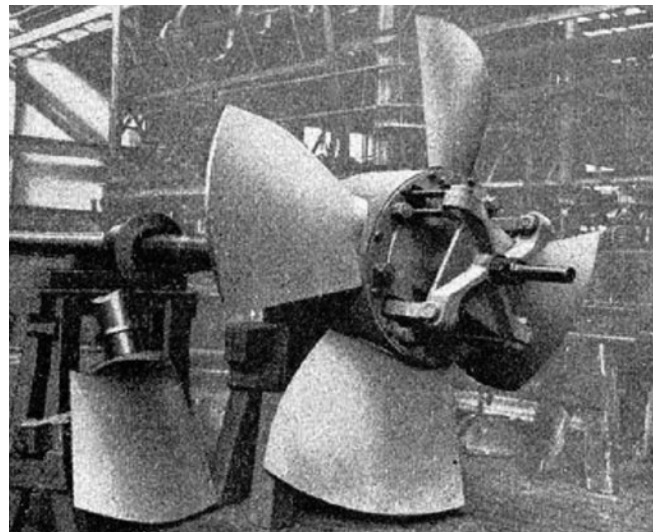
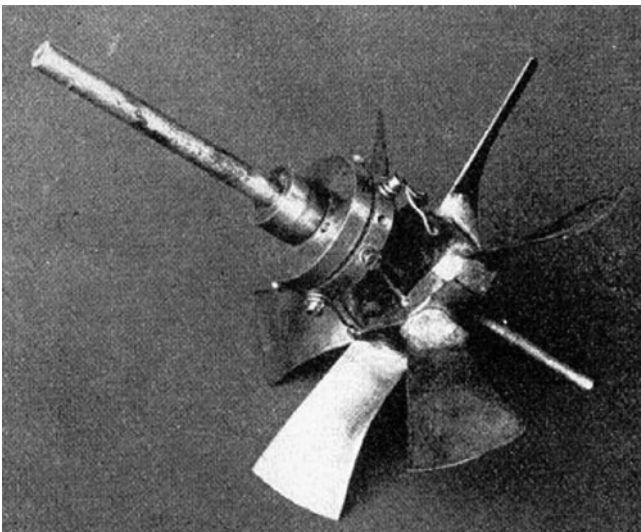


Bild 2: b) Kaplan-Versuchslaufrad (1912/13); c) Kaplan-Laufrad Lilla Edet (1925)



Bild 3: Eisengießer Ignaz Storek, Förderer Kaplans in Brünn

gleitet 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.

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 weit entfernt einer der auch heute noch größten Papierfabriken Europas von dem Unternehmen Verkstaden 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 Schaufelbelastungen mit dem dann fast unvermeidlichen Kavitationsphänomen hervorbrachten. Um dem Phänomen Herr zu werden, nahm Viktor Kaplan Änderungen an der Beschaukelungsgeometrie 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.

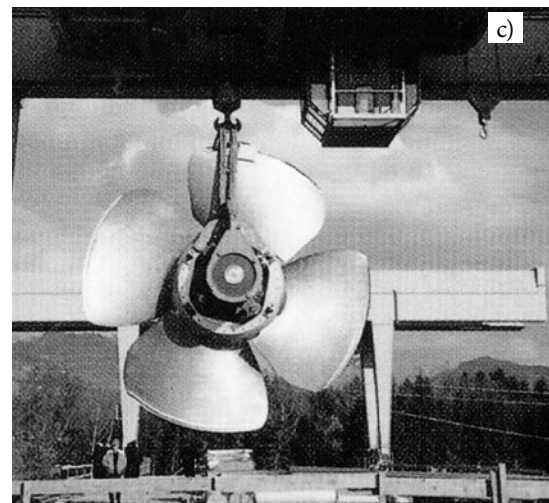
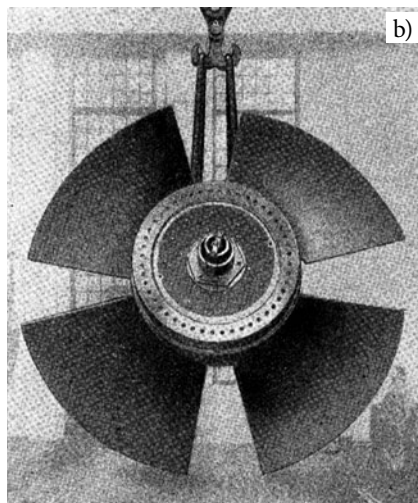
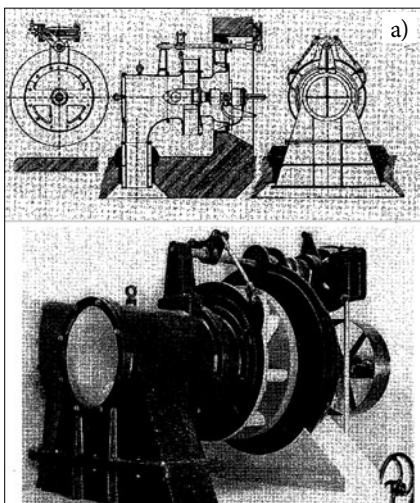


Bild 4: a) Die erste industrielle Kaplan-Turbine aus Velm, Niederösterreich, 1919; Die erste Kaplan-Großturbine und der Vergleich zu heute: b) Laufrad Lilla Edet (1925), $P = 8,1$ MW, $D = 5,8$ m; c) Oberaudorf-Ebbs (1992), $P = 34,5$ MW, $D = 6,1$ m

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 Schaufläche 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 Schaufläche. Die Herausforderung – und der Know-how-Vorsprung – besteht dann darin, den korrekten Flächenanteil für jede spezifische Schnellläufigkeit 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 Blasenschleppen 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

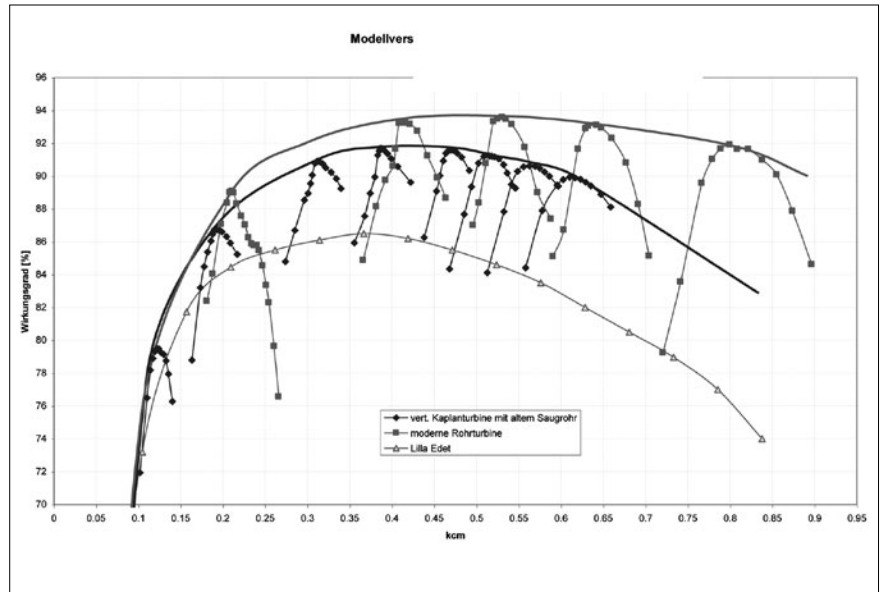


Bild 5: Wirkungsgrad und Fahrbereich, damals und heute

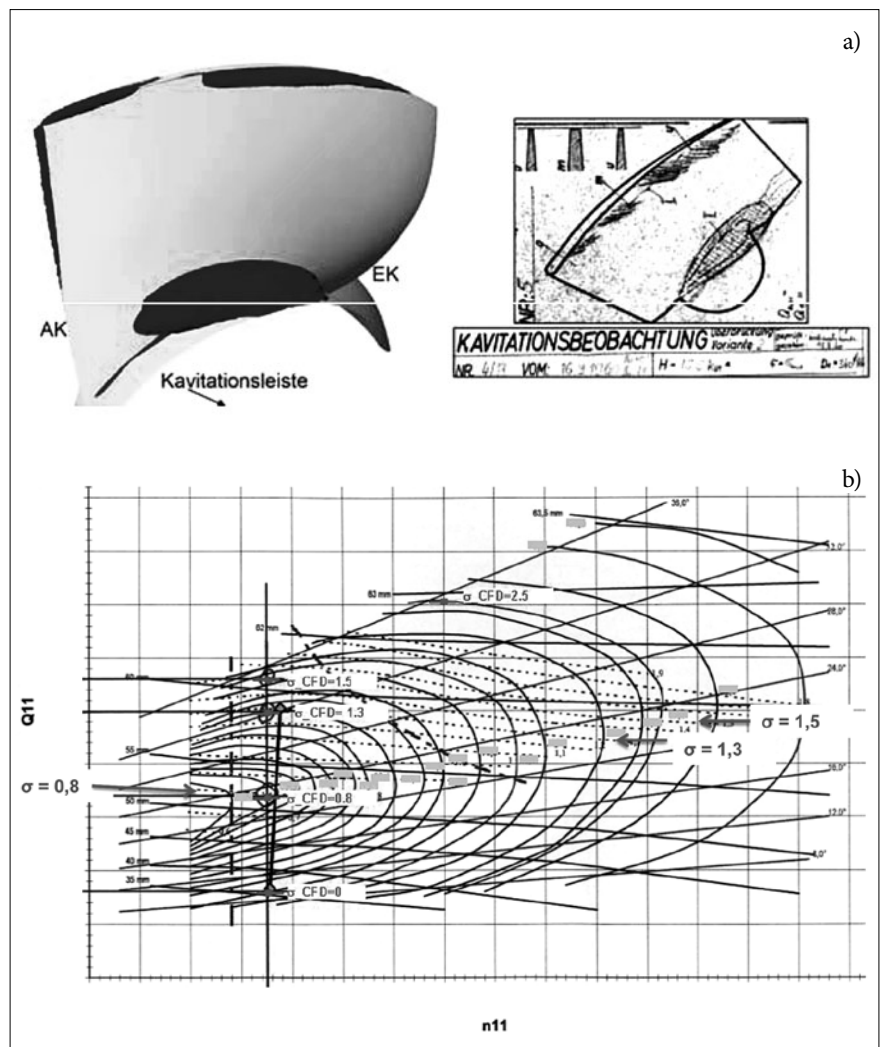


Bild 6: a) Vergleich gerechneter und gemessener Kavitationszonen [3]; b) Vergleich des gemessenen Kavitationskennfeldes einer Kaplan-Rohrturbine mit berechneten Sigma-Werten bei verschiedenen Schaufelstellungen

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 Sigma-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 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 Fachleute 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 viel schwieriger, weil streng genommen immer der Phasenübergang und die Kinetik der Flüssigkeit-Blasen-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 Laufschaukeln 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 Kavitationsverhaltens 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

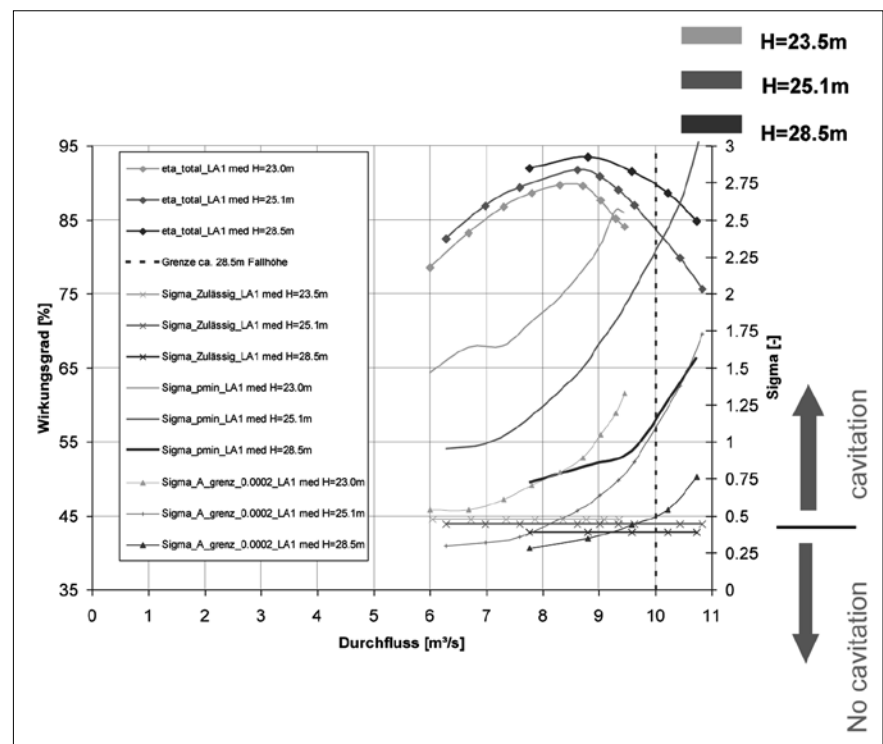


Bild 7: Verlauf der Thoma-Zahl einer Francis-Turbine und Vergleich mit den Anlagewerten für verschiedenen Leitschaufelstellungen und Fallhöhen

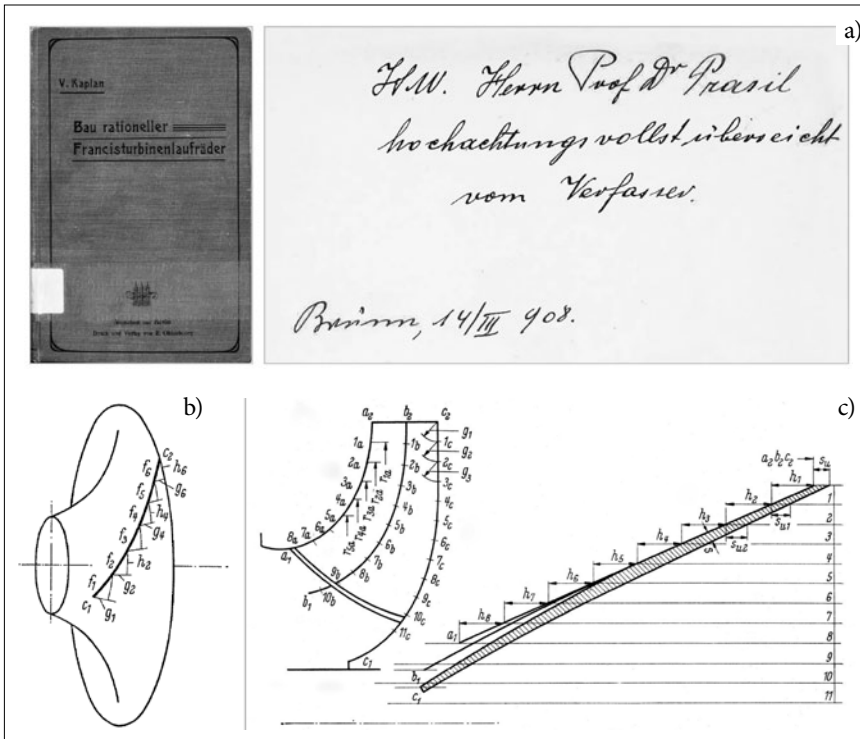


Bild 8: a) Veröffentlichung des Kaplan'schen Konstruktionsverfahrens mit Widmung; b) Dreidimensionale Stromlinie; c) Meridianschnitt und das konforme Abbild, die ebene Abbildung einer Schaufel mit korrekter Winkel- und Längendarstellung [7]

(**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 Hydrauliker sehr zuverlässig beurteilen, ob die Schaufel ein günstiges Strömungsverhalten aufweist und so-

mit 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] Gehrler, A.; Egger, A.; Riemer, J.: Numerical and Experimental Investigation of the draft tube flow downstream of a bulb turbine. In: Proceedings of the 21st IAHR Symposium on Hydraulic Machines and Systems, Lausanne, 2002.
- [2] Gehrler, A.; Benigni, H.; Köstenberger, M.: Unsteady Simulation of the Flow Through a Horizontal-Shaft Bulb Turbine. In: 22nd IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems, Stockholm, 2004.
- [3] Gehrler, 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.