

Stephan Heimerl *Hrsg.*

# Wasserkraftprojekte Band II

Ausgewählte Beiträge aus  
der Fachzeitschrift WasserWirtschaft

---

# Wasserkraftprojekte Band II

---

Stephan Heimerl  
Herausgeber

# Wasserkraftprojekte Band II

Ausgewählte Beiträge aus der  
Fachzeitschrift WasserWirtschaft

 Springer Vieweg

*Herausgeber*

Stephan Heimerl  
Leinfelden-Echterdingen, Deutschland

ISBN 978-3-658-07728-0  
DOI 10.1007/978-3-658-07729-7

ISBN 978-3-658-07729-7 (eBook)

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Springer Vieweg

© Springer Fachmedien Wiesbaden 2015

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen.

*Lektorat:* Dr. Daniel Fröhlich, Pamela Frank

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier.

Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media ([www.springer.com](http://www.springer.com))



**Dr.-Ing. Stephan Heimerl**

Chefredakteur der Fachzeitschrift WasserWirtschaft,  
Stuttgart

## Wasserkraft – noch immer eine innovationsfähige Technologie!

In zahlreichen aktuellen Studien zur künftigen Entwicklung in der Energieversorgung ergibt sich für die Wasserkraft vielfach folgendes Bild: Bei der Wasserkraft handelt es sich zum einen um eine ausgereifte Technologie, mit der seit langem wirtschaftlich Strom erzeugt wird. Gleichzeitig ist aber zum anderen das Potenzial dieses Energieträgers in den deutschsprachigen Ländern bereits weitestgehend ausgeschöpft. Zur Zukunft der Wasserkraft werden dabei in der Regel die derzeit genutzten Potenziale und die unter gewissen Randbedingungen noch weiter nutzbaren Wasserkräfte unter Bezugnahme auf die wesentlichen bekannten Ausarbeitungen aufgeführt.

Die Realität bei der Nutzung der Wasserkraft zur Stromerzeugung ist jedoch weitaus differenzierter, so dass ihr eine derartig vereinfachte Darstellung sicherlich nicht gerecht werden kann. Diese Anlagen haben bemerkenswerte und wichtige Vorzüge, die innerhalb des Verbundnetzes von großer Bedeutung sind. Somit ist notwendig, die derzeitige Nutzung ohne wesentliche Einschränkungen zu erhalten und die durchaus noch vorhandenen Potenziale und Entwicklungsmöglichkeiten der Wasserkraft in Deutschland, Öster-

reich und der Schweiz sowie darüber hinaus optimal zu erschließen.

Dabei gibt es sowohl beim Bau als auch dem Betrieb von Wasserkraftanlagen eine Reihe von Hemmnissen nicht zuletzt auch infolge des komplexen Rechtsrahmens: Neben den üblichen Festlegungen und wasserrechtlichen Auflagen haben Wasserkraftanlagenbetreiber vielfach noch weitere öffentlich-rechtliche Aufgaben zu erfüllen, die häufig einen spürbaren Wettbewerbsnachteil gegenüber anderen Energieträgern bedeuten und der die Wirtschaftlichkeit der Standorte belastet. Hinzu kommen zahlreiche Restriktionen aus der in nationalstaatliches Recht umgesetzten Europäischen Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) und der daraus abgeleiteten Maßnahmenprogramme, dem Erneuerbare-Energien-Gesetz in Deutschland und den parallelen Einspeisegesetzen in anderen Staaten sowie mannigfaltigen anderen Regularien.

Doch ist die Wasserkraft tatsächlich schon „am Ende des Machbaren“ angelangt? - Die Antwort ist eigentlich eindeutig: Sicherlich nicht!

Wenngleich die Wasserkraft eine der ältesten Techniken zur Gewinnung von mechanischer und auch elektrischer Energie in größerem Stil dar-

stellt, so waren immer wieder findige Geister zur Stelle, um diese Energieerzeugungsform mit neuen Ideen voranzubringen.

Ein Beispiel, von dem in diesem vorliegenden Buch ausgiebig mit mehreren Beiträgen berichtet wird, ist Viktor Kaplan, der 1913 sein wichtiges Patent für die nach ihm benannte Kaplan-Turbine eingereicht hat, um die Nutzung der Wasserkräfte voranzutreiben. Über sein Schaffen und Wirken auf dem Weg zur Umsetzung seiner ersten Ideen bis hin zu deren Nutzung in der Gegenwart berichten einige Beiträge in einem separaten Kapitel. Hierbei wird deutlich, welch innovativer Geist diesem Ingenieur inne wohnte, der heute mit seiner Beharrlichkeit und Standfestigkeit doch dahingehend als Vorbild dienen kann, dass man eine gute Idee trotz mancher Rückschläge weiter verfolgen sollte. Als Ansporn kann dabei auch dienen, dass man kritischen Anregungen offen bleibt und mit Gesprächspartnern das Erreichte diskutiert, um zu weiteren Entwicklungsstufen zu gelangen.

In ähnlicher Weise ist die Wasserkraft-Branche heute mit anderen Themen konfrontiert, bei denen sie Lösungen suchen muss und sicherlich auch noch weiter finden wird. Hierfür können unter anderem exemplarisch die Themenkomplexe des Fischaufstiegs, des Fischschutzes und Fischabstiegs sowie der Nutzung der Wasserkraft ohne durchgehende Querverbauungen genannt werden. Zu manchen Themen existieren bereits etliche Lösungen, zu anderen sind diese erst in Ansätzen vorhanden, da auch nicht immer das komplette Systemverständnis vorhanden ist und manches erst noch erforscht werden muss. Hiervon

zeugen die zahlreichen Beiträge der jüngsten Vergangenheit in diesem Buch.

Um diese und andere Fragestellungen sowie Entwicklungen voranzutreiben, waren und sind bis heute unabhängige Informations- und Wissensplattformen notwendig, über die neue Erkenntnisse an die Fachkreise in Wissenschaft und Praxis dauerhaft weitergegeben und vom Jungingenieur bis hin zum erfahrenen Senioringenieur reflektiert und aufgenommen werden.

Seit über 100 Jahren leistet dabei die Fachzeitschrift *WasserWirtschaft* einen wichtigen Beitrag zum fachlichen Austausch und Diskurs, indem seit jeher in dieser unabhängigen Fachzeitschrift innovative, zukunftsorientierte sowie qualitativ hochwertige Beiträge wiedergegeben werden, die die Fachkreise zu Diskussionen anregen sollen, mit dem Ziel, heute und morgen die jeweils beste Lösung finden zu können.

Nachdem der erste Band mit verschiedenartigen Beiträgen zum Themenkomplex der Wasserkraft aus der Fachzeitschrift *WasserWirtschaft* auf großes Interesse gestoßen ist, soll mit diesem Band II erneut ein Einblick in die Themenvielfalt in diesem Bereich gegeben werden, die in den letzten Jahren durch Veröffentlichungen angesprochen wurde. Abermals soll diese Zusammenstellung sowohl der Information dienen als auch den fachlichen Diskurs über die Wasserkraft und des zugehörigen Umfeldes anregen.





**Dipl.-Ing. Peter Molinari**

Vorstandsvorsitzender der Arbeitsgemeinschaft  
Alpine Wasserkraft (AGAW), Zernez, Schweiz

## Arbeitsgemeinschaft Alpine Wasserkraft - AGAW

# Faszination Wasserkraft

Die Strommarktpreise tendieren seit geraumer Zeit nur noch nach unten. An einem durchschnittlichen Tag wird an der Strombörse in Leipzig eine Kilowattstunde noch für vier Euro-Cents oder weniger gehandelt und in Extremfällen geht der Preis in den Minusbereich. Das liegt deutlich unter den Gesteungskosten von so manchem bewährtem Wasserkraftwerk nicht nur in den Alpen. Kein Wunder, werden bereits begonnene Großprojekte, wie z. B. Lindt-Limmern oder Nant de Drance in der Schweiz, ohne viel Begeisterung und unter drastischen Sparmaßnahmen fertig gebaut und neue, baureife Projekte auf Eis gelegt. Für die Wasserkraft stehen karge Jahre bevor und die bei Wasserkraft-Sympathisanten für Besuche beliebten Großbaustellen dürften in Zukunft spärlich gestreut sein.

Dass der Marktwert und die soziale Akzeptanz der Wasserkraft sich in den vergangenen Jahrzehnten jedoch nicht linear auf dieses aktuelle Tief hin zu bewegt haben, sondern dass deren Entwicklung einer Berg- und Talfahrt gleicht, zeigt folgende Betrachtung:

Bis zur Mitte des letzten Jahrhunderts herrschte der große Wasserkraft-Boom. In dieser Periode wurden die meisten der großen Speicherkraftwer-

ke in den Alpen gebaut. Mit dem Aufkommen der Nuklearenergie geriet die Wasserkraft aus dem Fokus des Interesses, ja es wurde sogar prophezeit, dass mit der Kernenergie keine weiteren Flüsse für die Wasserkraft mehr verbaut werden müssten und viele sagten das Ende dieser Technologie voraus. Mit den ersten Reaktorunfällen kamen die Atomkraftwerke vermehrt in die Kritik und die Wasserkraft erlebte eine erneute Blütezeit. In den Neunzigerjahren des letzten Jahrhunderts ging die Angst um, dass die auf lange Sicht getätigten Investitionen in Wasserkraft wegen der bevorstehenden Strommarktöffnung nicht mehr abgeschrieben werden könnten – man sprach von „nicht abschreibbaren Investitionen“ oder NAI und kaum jemand war bereit, weiterhin in die Wasserkraft zu investieren. Mit dem Vollzug der ersten Marktöffnungen in Europa verfloß die Angst vor deren Auswirkungen und die rekordhohen Preise an den europäischen Strombörsen im ersten Jahrzehnt des laufenden Jahrhunderts verursachten einen neuen Höhepunkt für die Wasserkraft. In diese Periode fielen die Bauentscheide und z. T. Realisierungen großer Pumpspeicherwerke in den Alpen, so wie z. B. Kopswerk 2, Lindt-Limmern und Nant de Drance. Es können

mithin seit dem Bau des ersten Wasserkraftwerks vor ca. 130 Jahren bis heute mindestens je drei *Wasserkraft-Hochs und -Tiefs* gezählt werden.

Diese zyklische Entwicklung gibt Anlass zu Hoffnung: nach dem aktuellen Tief wird mit Bestimmtheit wieder einmal ein Hoch folgen.

Neben dem Feuer gehört die Wasserkraft zur ältesten vom Menschen zur Energieumwandlung angewendeten Technologie. Trotzdem wage ich die Behauptung, dass die zur Stromgewinnung aus Wasserkraft notwendigen Technologien zu jenen gehören, über welche bereits am meisten Literatur existiert und weiterhin produziert wird.

Unabhängig von wirtschaftlichen Überlegungen stimmt aber die Tatsache, dass die Wasserkraft trotz ihrer Jahrhunderte alten Tradition nach wie vor so viel ungetrübte sowohl technische als auch emotionale Faszination auszuüben vermag,

weitaus zuversichtlicher als das passive Warten auf ein nächstes Hoch.

Der vorliegende Band ist lebendiger Zeuge für diese Faszination, die auch in der AGAW besteht und gefördert wird. Es ist mir deshalb ein Anliegen, den Initianten dieses zweiten Bandes „Wasserkraftprojekte“ sowie den Autoren dafür zu danken, dass sie sich für den Erhalt und das Schüren dieser Faszination engagieren und dazu beitragen, dass das Know-how über die Wasserkraft erhalten und weiter entwickelt wird. Mit solchen Verbündeten hat die Wasserkraft noch lange nicht ihr letztes Wort gesprochen!

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'P. Allert', is centered on a light-colored rectangular background.

# Inhaltsverzeichnis

Wasserkraft – noch immer eine innovationsfähige Technologie! .....	V
Faszination Wasserkraft .....	VII
<b>Wasserkraftwerke und Architektur</b> .....	1
Wasserkraftwerke und Architektur .....	2
<b>Kaplan-Turbine</b> .....	11
Viktor Kaplan und seine bahnbrechenden Erfindungen – Zum Andenken an das 100-jährige Jubiläum der Patenteinreichung .....	12
Viktor Kaplan – Höhen und Tiefen eines Erfinderlebens .....	22
Die Entwicklung der Kaplan-Turbine .....	43
Viktor Kaplan und seine Turbine bei Voith .....	53
Gegenwart und Zukunft der Kaplan-Turbine bei Andritz Hydro .....	64
Viktor Kaplan und sein in Brünn geschaffenes Werk .....	71
<b>Potenziale</b> .....	77
Wasserkraft in Baden-Württemberg – Stand und technische Entwicklungen .....	78
Simulation von Gezeitenströmungen zur Standortanalyse und Bestimmung vorhandener Potenziale.....	84
Die Bundeswasserstraßen als Energiespeicher – Potenzial und Herausforderungen.....	90
Umnutzung von Talsperren für die Energiewende .....	96
Ausnutzung des Wasserkraftpotenzials des Talsperrenbetriebes Sachsen-Anhalt unter Beachtung der hoheitlichen „Tätigkeit als Anstalt des öffentlichen Rechts“ .....	102
Potenzialstudie für Pumpspeicherkraftwerke in Baden-Württemberg .....	109
GIS-basierte Standortsuche für Pumpspeicherwerke in Norwegen .....	117
<b>Entwicklungen</b> .....	123
Numerische Untersuchungen mit Telemac bei Wasserkraftanlagen – zwei Fallstudien.....	124
Wasserkraftpotential einfach und effizient nutzen: StreamDiver®-Technologie von Voith.....	134
Nutzung kleiner Fallhöhen – ein Beitrag aus Forschung und Entwicklung .....	141
Strömungsverhalten in wassergeschmierten Axial- und Radialgleitlagern .....	147
Betriebsbereiche und Wirkungsgrade der Wasserkraftschnecke .....	154

Betriebsarten von Wasserkraftschnecken .....	164
Experimentelle Untersuchungen an einem Wasserwirbel-Kraftwerk.....	172
Entwicklung kleiner Pumpturbinen – Vorteile eines modularen Ansatzes.....	182
Ride the Tide – Tidenturbinenforschung an der TU Berlin .....	189
<b>Projekte</b> .....	195
Die Wasserkraftanlage Leerstetten	
am Main-Donau-Kanal.....	196
Ausgangslage am neuen Wasserkraftwerk Rheinfelden .....	203
Neubau des Stauwehrs in Rheinfelden .....	211
Rohbau des Maschinenhauses Rheinfelden.....	218
Turbinen, Generatoren und Stahlwasserbau	
des neuen Wasserkraftwerks Rheinfelden .....	227
Elektro- und Leittechnik des neuen Wasserkraftwerks Rheinfelden .....	237
Nebenanlagen des neuen Wasserkraftwerks Rheinfelden.....	245
Inbetriebsetzung und Betrieb des neuen Wasserkraftwerks Rheinfelden .....	249
Rückbau der Altanlage Kraftwerk Rheinfelden .....	254
Bauperipherie beim neuen Wasserkraftwerk Rheinfelden .....	262
Entwurf des Pumpspeicherkraftwerks Lagobianco.....	271
<b>Pumpspeicherkraftwerke</b> .....	277
Pumpspeicherkraftwerke zwischen politischem Wunsch	
und ökonomischer Realität.....	278
Potenziale für Pumpspeicherkraftwerke: Studien für Thüringen	
und Baden-Württemberg .....	284
Das Rudolf-Fettweis-Werk in Forbach – Ein Pumpspeicherwerk auf dem Weg	
in die Zukunft.....	291
Ein Beitrag zur Druckstoßberechnung von Pumpspeichieranlagen .....	298
Alternatives Pumpspeicherkonzept in Form eines Unterflur-Lageenergiespeichers	
mit Sekundärspeicher .....	310
Pumpspeichieranlagen – Entwicklungsschritte im Rückblick und Ausblick .....	321
Chancen und Risiken untertägiger Pumpspeicherwerke in Steinkohlebergwerken	
im Ruhrrevier.....	330
Unterirdische Pumpspeicherwerke – eine Alternative? .....	336
Wirtschaftlichkeit von Pumpspeicherwerken am Spotmarkt .....	341
Tiefspeicherdimensionierung unterirdischer Pumpspeicherwerke –	
Numerische Modellierung .....	347

<b>Ökologie und Rahmenbedingungen</b> .....	355
Hochwasserschutz contra Wasserkraft – ein unlösbarer Konflikt? .....	356
Neubau der Wasserkraftanlage Willstätt mit Fischschutz und vollständiger Fischwechsellanlage .....	362
Die fischfreundliche Turbine – ein innovativer Lösungsansatz .....	369
Wasserkraft und/oder Naturschutz? – Variantenuntersuchung zur Sanierung der Unteren Salzach .....	376
Bewirtschaftung alpiner Speicherkraftwerke unter Berücksichtigung klimatischer und wirtschaftlicher Veränderungen .....	385
Lenkungswirkung der Erneuerbare-Energien-Gesetze (EEG 2004 und 2009) für die ökologische Modernisierung von Wasserkraftanlagen – Ergebnisse einer Umfrage .....	392
Energieeffizienz in der Fernwasserversorgung am Beispiel der Landeswasserversorgung .....	400
Geschichte und Hintergrund des Protokolls zur Evaluierung der Nachhaltigkeit von Wasserkraftprojekten .....	412
Wozu ein freiwilliges Protokoll für Wasserkraft, wenn es doch Standards gibt? .....	421
Das Nachhaltigkeitsprotokoll für Wasserkraft aus Sicht des WWF .....	429
Motivation eines Lieferunternehmens zur Unterstützung und Messung von Nachhaltigkeit bei der Planung und Umsetzung von Wasserkraftprojekten .....	434
Anwendbarkeit des Protokolls zur Bewertung der Nachhaltigkeit von Wasserkraftwerken bei staatlichen Exportkreditgarantien .....	442
Erkenntnisse aus der ersten praktischen HSAP-Anwendung in Europa aus Sicht von E.ON .....	447
Fischschutz und Fischabstieg im Dialog – Forum „Fischschutz und Fischabstieg“ .....	457
Fischschutz und Fischabstieg: Erfordernisse aus dem Blickwinkel eines Fischerei- und Naturschutzverbandes .....	465
Vorgehensweise zur Entwicklung von populationsunterstützenden Maßnahmen für die Fischarten am Inn in Oberbayern .....	474
Maßnahmen zur Förderung von Populationen bedrohter Fischarten am Inn (Oberbayern) im Rahmen des Gewässerunterhaltes .....	487
Maßnahmen zur Förderung von Fischpopulationen in Schwaben .....	500
Funktionskontrolle der Fischwechsellanlagen am Main-Kraftwerk Kostheim .....	509
Durchgängigkeitskonzept Unstrut .....	520
<b>Autorenverzeichnis</b> .....	529

# Wasserkraftwerke und Architektur

Max Rieder

# Wasserkraftwerke und Architektur

Wasser als Lebenselixier prägt in den unterschiedlichen Klimazonen unterschiedliche Architekturen und bauliche Strukturen aus. Unsere Zivilisationsgeschichte ist untrennbar mit Wasser verknüpft. Wasser ist die formoffenste Gestaltungskraft. Die unendliche Vielfalt durch Randbedingungen und Aggregatzuständen wird im herkömmlichen Anlagenbau trivialisiert. Alle Wassertechnologien sollten sichtbar, bewusst und im höchsten Maße Kunst und Kultur darstellen. Die im Wasser liegenden, einbetteten Energien verlangen nach architektonischem Ausdruck. Die Architektur ist letztendlich eine soziale Kunst, so wie Wasser ein das Soziale begründende Element darstellt. Die Maßstäbe der Wasserkraftanlagen können durch ihre Verortung (urban, rural) verzerrt und unterschiedlich sein, jedoch kann jedes Wasserkraftwerk Ortsidentitäten begründen oder eben zerstören. Der Maßstab, die Dramaturgie der Anlagenelemente und ihre Oberflächentexturen erfordert hohe Sensibilität zum Stand-Ort. Jedes der sechs vorgestellten Beispiele stellt ein singuläres Phänomen dar.

## 1 Wasser und Architektur – eine mehrfache Wechselbezüglichkeit

Wasser als Lebenselixier in den unterschiedlichen Klimazonen prägt unterschiedliche Bebauungsstrukturen und Architekturen aus. Die Nutzungsmöglichkeiten und Nutzungserfordernisse von Wasser sind breitgefächert. Als alltäglicher Überlebensstoff, zur Hygiene, Erholung und technischen Nutzung wird Wasser mehr als nur überlebensnotwendige Infrastruktur, sondern auch zum Fokus philosophischer und künstlerischer Überlegungen und Manifeste.

Wasserabweisung, Wasserherleitung und die darin liegenden Energien sind verknüpft mit Sesshaftigkeit und der Herausbildung von Einzelhöfen, Siedlungen und Städten. Einerlei, ob im großen Maßstab der Stadtgründung (Furt und Wassergraben) oder im kleinen Maßstab der Hofgründung (Zisterne oder Brunnen), Wasser ist konstituierendes Element. Dies zeigt sich in Kultur-, Sozial- und Arbeitsgeschichte wie bei entsprechenden Infrastrukturen durch, über, mit, ins und unters Wasser (Brücken, Rückhaltesysteme, Aquädukte, Mühlen).

## 2 Wasser – formoffen und Gestaltvielfalt

Wasser ist die formoffenste und formfreieste Gestaltungskraft.

Die Aggregatzustände des Wassers generieren die vielfältigsten Formerscheinungen und Gestaltungsmöglichkeiten. Man könnte sagen: Alles ist Wasserform, alles ist Energie.

Die Architektur der Welt hat sich also zwangsläufig mit den Möglichkeiten der Wassergestalten und Wasserformen auseinanderzusetzen.

Es ist eine formal-konzeptuelle, konstruktiv-technische und wirtschaftliche Frage und Haltung, welcher Gestaltausdruck zur Ausarbeitung kommt. Die letztendlich wirtschaftliche Frage kann aber nur über ein gesamtkulturelles Anspruchsdenken (Philosophie und Wertvorstellung) entschieden werden. Wenn man wie so oft erfreut ist, dass ein Wasserkraftwerk oder eine sonstige technische Anlage unsichtbar, unterirdisch, getarnt oder als Schuppen bzw. im Schrebergartenimage mit Gründach errichtet wird – dem Bewußtseinspotenzial der Menschheit und Natur wird es nicht gerecht. Erscheinung, Wahrnehmung – also Evidenzen des Wassers – erklären uns mehr über unser Dasein und Ressourcenbewußtsein als ihre



**Bild 1:** Türkei, 2007

Intransparenz und Camouflage. Mit Wasser zu arbeiten ist ein der wohl ehrwürdigsten Gestaltungsaufgaben.

Die simpelst-komplexe Form der Erscheinung des Wassers ist die Horizontale, der sich einstellende Potentialausgleich eines waagrechten Ruhezustandes (vergleiche dazu Wasserwaage und Quasi-Staubereich). Die komplex-simpelste Form der Erscheinung des Wassers ist die Vertikale, das sich einstellende fallend-bewegte Kinetische einer Dynamik (vergleiche dazu Wasserfall und Quasi-Überfall). (**Bild 1**)

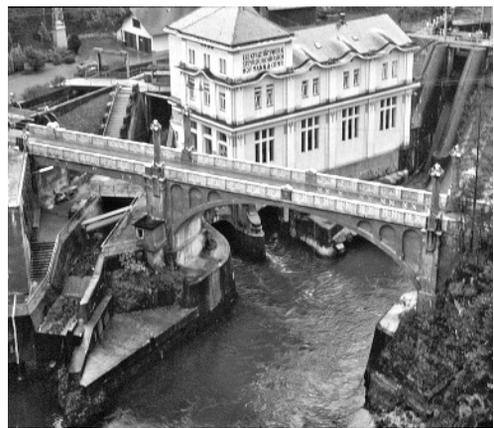
Aber die wahrlich komplexen Formerscheinungen entstehen im latenten Übergang von Ruhen und Bewegten, dem sogenannten (laminaren) Fließen und (turbulenten) Schießen. Die Mannigfaltigkeit und das übergangslose hin und her der Zustände – immer ein bisschen so, ein bisschen so –,

erfreuen unser Gemüt und Erkenntnis. Diese erzeugen unterschiedlichste Landschaftsformationen und Kraftspuren einer selbstorganisierenden Gestaltung.

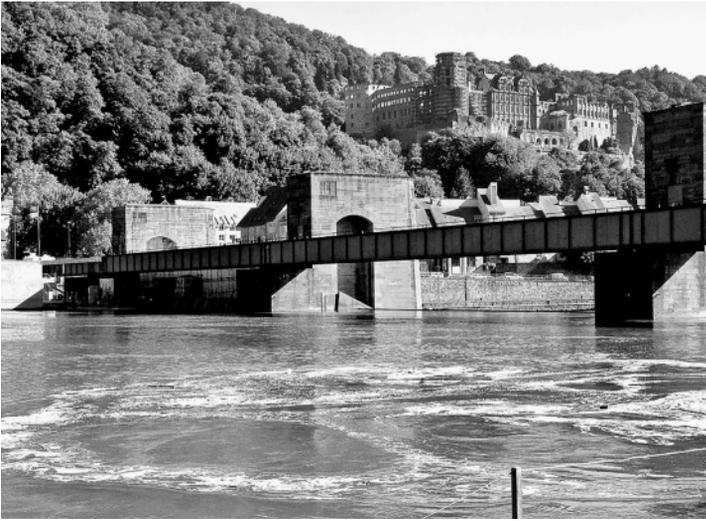
Diese Formevindenz werden (meist) unbewusst Teil unserer Kultur-, Kunst- und Gestaltungsgeschichte der Welt, der Weltgestalt und Weltmoden. Auch alle Erscheinungsformen der sichtlichen oder vermeintlichen Abwesenheit von Wasser, wie Wüsten- oder Dünenlandschaften, erzeugen einen stillen, unsichtbaren Wassergestaltungscodex.

Kurzum die Unendlichkeit der Wasserformen äußert sich als formgebende oder formnehmende abstrakte oder reale Kraft, welche die Stoffe der Welt von Wolkendampf bis Eisvolumen formt. Diese Immanenz des Wassers ist somit allen Formen und Gestalten dieser Welt eingeschrieben (vergleiche dazu Turgorkräfte in Pflanzen, Tier und Mensch).

Das heißt – in postmodernem Sinn – jede Form und Gestaltung wäre zulässig und denkbar, wenn nicht kontextbedingte Rahmenbedingungen (Klima, Kultur und Örtlichkeit) Spezifikationen erfordern würden. Das Talschlusskraftwerk und das Gezeitenkraftwerk unterliegen anderen Wahrnehmungs- und Sensibilisierungshorizonten und unterscheiden sich deshalb (hoffentlich). Andererseits fordert die Ökonomisierung das Standardisierende. Das in ruralem Gebiet gelegene Kleinkraftwerk könnte doch im besten Sinne einer fortschrittlichen, transnationalen Moderne sich immer gleich wiederholend reproduziert werden?



**Bild 2:** Kraftwerksanlage Steyrdurchbruch 1904 (Quellen: wikipedia & M. Rieder)



**Bild 3:** Staustufe Heidelberg/Neckar (Quelle: Ernst Wassmuth Verlag)

Dies ist die Maxime der Anlagenbau- und Energieindustrie, aber diese steht diametral zu den Maximen der Anrainer, Passanten und Allgemeinheit. Dieser Widerspruch, das allgemeine Technisch-Erwartete soll sich im urban öffentlichen Raum oder im ruralen Umfeld als das außergewöhnliche Spezifisch-Anregende äußern bzw. erscheinen, um eine Legitimation zu erfahren.

Die Transformation der Kontexte zu einem sinnstiftenden Ganzen (Ökonomie und Phänomen) fordert Wasser und seine technologischen Anwendung ein. Die im Wasser liegenden, eingebetteten Energien verlangen nach Ausdruck, quasi als Pate der *conditio humana* und *civitas universalis*.

Die Logik der sinnstiftenden Gestaltung äußert sich nicht im Entscheid für rational-orthogonales oder alternativ organisch-freiformen geprägtes Design, sondern beherbergt beide Gestaltungsmöglichkeiten.

Wenn die Architektur ein Beziehungsgeflecht zum Menschen herstellt, so stellt die Wasserkraft eine Beziehung zu Naturelementen her, welche durch Maschinen, Geräten und Technologien manifest werden. Diese Anlagenelemente benötigen wiederum eine architektonische Organisation (Zuordnung und Gestalt), damit die Beziehungslücke zum Menschen geschlossen wird. Ansonsten werden diese Anlagenteile wahrnehmungspsychologisch als Naturverbetonierer apostrophiert.

Zwar ist die Domäne der Architektur der Raum, der gemeinsame und private Raum für Menschen, die Raumorganisation, die Kreation von Raumphänomenen und Raummilieus, also inneliegender sozialer Impetus.

Architektur ist nicht – wie viele meinen – Ästhetisierung von Strukturen, Konstruktionen, Nutzungen und Funktionen – im engeren Sinn von Bauwerken. Dieser Zugang mag für manche gelten, daraus entstehen dann decorated boxes, also zeitgeistige Verschönerung. Die inhaltliche Komponente der Architektur ist systemisch, dies bedeutet „Durchwirkung von Form-Gestalt-Funktion-Kontext und Gesellschaftswerten“, letztendlich eine soziale Kunst.

Gestaltung lässt sich nicht vermeiden, selbst die bloße rationale Konstruktion wird immer als Gestaltung wahrgenommen und besitzt bewusst oder unbewusst Gestalt. Dies dürfte vielen Ingenieuren und Architekten erkenntnistheoretisch entgangen sein: man kann nicht nichtgestalten.

Was sind aber die Ausschließungsgründe für bewusste oder gewünschte Gestaltung?

Es zeigt sich, dass der verspätete Einsatz der Gestalter, nachdem fast alles hydraulisch, verkehrlich, technisch, konstruktiv usw. festgelegt wurde (Trassenführung, Lageverortung etc.), dass Gestaltung sich als ein nachträgliches, kostspieliges Pimpen budgetär niederschlägt. Jede Maßnahme, selbst Begrünung und Anstrich erfordern ausweisbare Zusatzbudgets. Wäre dies vielleicht bei



**Bild 4:** Wasserkraftanlage Hangenden Stein/Königsseeache (Quelle: M. Rieder)



früher interdisziplinärer Entwicklung und Involvierung des Gestalters vermeidbar gewesen oder hätte gar zu einer kongenialeren, günstigeren Lösung geführt?

Faktum ist, dass Gestaltung von Infrastrukturen, wie Stromleitungen, Straßenbau, Brücken, Skipisten, Haltestellen, Kraftwerken aller Art, bis zum medialen Auftritt von Bürgerprotesten bisher für entbehrlich gehalten wurde und erst als Mittel zum Zweck, quasi als Beruhigungs- und Integrationstherapie nachträglich zugezogen wird. Deshalb kann man im doppelten Sinn von oberflächlicher, entlarvender Gestaltung sprechen. Damit entstehen tatsächliche Zusatzkosten, die bei der Wahl eines kooperativen, interdisziplinären Lösungsansatzes von Beginn an entfallen würden. Begrünung oder Farbbeschichten sind heute keine adäquaten Gestaltungskonzepte – selbst der Naturschutz hat die ästhetische Komponente (z. B. bei Windkraftanlagen, Biogasanlagen) heute erkannt.

Die Scheuklappen der jeweiligen Disziplin (Technik, Verkehr, Architektur usw.) vor anderen Einzeldisziplinen sind übergroß. Die eindimensionalen Sichtweisen führen radial auseinander oder bestenfalls zu Parallelsträngen, also ohne Konvergenz und Gemeinsames. Wir sollten so bald wie möglich die Disziplinen für Projekte zusammenbringen und originäre, dem Standort entsprechende Lösungen finden.

### 3 Kontextbeispiele

Die nachfolgenden Beispiele stellen unterschiedliche Größenordnungen, Typologien und Kontexte dar.

Das Wasserkraftwerk Steyrdurchbruch an der Steyr, Österreich, als avantgardistische Industrieanlage aus 1904 (Jugendstil) wird heute als Industriedenkmal und Naturschutz verstanden (**Bild 2**). Das Laufkraftwerk von Mauriz Balzarek dokumentiert die Verschmelzung von Natur und Technik zu einer aufregenden Szenerie. Vor über hundert Jahren wurde ein Gesamtkunstwerk durch unterschiedlichste Anlagenelemente choreografiert, welches die Energien der natürlichen und technischen Elemente erfahrbar machen.

Die Neckarstaustufen nahe Heidelberg, Deutschland, von Paul Bonatz wurden als Ingenieurbauten in ihrer guten Gestaltung um 1920 in die Leere der damaligen Kulturflusslandschaft realisiert (**Bild 3**). Die Heranziehung von Architekten für Flusskraftwerke erwies sich als glückliche Fügung und stellt sich heute als integrales Landschaftselement im milden Talraum dar. In die Sichtweise zur Heidelberger Altstadt gelegene Staustufe sollte, so der Architekt, „das Einwachsen des Bildes“ ermöglichen. Die Farb- und Oberflächenwahl der Wehrpfeiler bezog sich explizit auf den örtlichen, rötlichen Sandstein.

Ein systemischer Ansatz konnte vom Autor an der österreichisch-deutschen Staatsgrenze zwischen Salzburg und Berchtesgaden bei Hangenden Stein an der Königsseeache 1990 realisiert werden (**Bild 4**). In Österreich, einem reichen



**Bild 5:** Dammkörper  
Banja/Devoll (Quelle: M.  
Rieder & E. Wagner)



**Bild 6:** Kraftwerk Kokel/  
Devoll (Quelle: M. Rieder &  
E. Wagner)

Wasserkraft-Land, erhielt – trotz den außergewöhnlichen Anfängen des Kraftwerksbaus, wie Nussdorfer Wehr, Donaukanal (Otto Wagner) oder des geschilderten Steyrdurchbruchs und Ypps-Persenbeug an der Donau (Clemens Holzmeister), die Gestaltungsdimension von technischen Anlagen lange Zeit keine Bedeutung mehr. Dies in einem Land, dessen größter Rohstoff die landschaftlichen Reize für den Tourismus sind. Sehr spät in den 1980-Jahren der Postmoderne begannen verantwortungsvolle kleine Auftraggeber ihre Kleinkraftwerke unter Hinzuziehung der Architekten wieder bewusst zu gestalten. An der Königsseeache nächst der Staatsgrenze

konnte ein neuer Weg beschritten werden: Wasserkraftanlage und Landschaftsformation verschmelzen zu einem skulpturalen Artefakt. Die Gemeinde- bzw. Funktionslage von Rampe, Geschiebe, Einlaufrechen, Einlauf Almkanal, Ruhebecken, Streichwehr, Leerschuss, Turbinensätze, Fischtreppe, Unterwassereinfahrt und Einbindung ermöglichte eine Energieskulptur in den Fluss zu positionieren, quasi eine Wallfahrtskirche des Wassers und seiner Energien. Heute, patiniert, stellt es eine visuell-organische Bereicherung längs der Flusswanderwege dar.

Ruraler, naturräumlich geprägte Standorte in den Devoll-Flusstälern bei Banjy, Gramsh und



**Bild 7:** Kraftwerk Kempton/Iller (Quelle: Becker Architekten)

Kokel, Albanien. Unsere östlichen europäischen Nachbarn weisen großes Potential für Wasserkraftanlagen auf. Wir wissen: Je schöner ein Landschaftsensemble und das (unberührte) Flussmilieu sind, umso ärmer ist die Region oder die Nation. Eine fatale Erkenntnis, die so weit fruchtet, dass man sich als Architekt und Planer die Ethikfrage der Zulässigkeit einer gestalterischen Intervention stellen muss, darf an jedem energetischen Standort die Nutzung möglich werden oder anders gesagt darf jeder Standort energetisch genutzt werden. Im Fall der albanischen Bergausläufer muss man die Beziehung von Artefakten und Natur neuformulieren. Landschaftskunst, neue Topographien kreieren, so sind die Gestaltungshaltungen des Projektes von Erich Wagner und dem Autor der beiden folgenden Beispiele zu verstehen.

Einmal das breite Flusstrogtal bei Banja mit extensiver Tierhaltung und kargem Bewuchs. Ein talbreiter Damm soll entstehen (**Bild 5**). Oberwasserseits entsteht durch die Stauwasserlandschaft eine neues Mikroklima und unterwasserseits ein Dammkörper, der integraler Teil der bestehenden Geländeformationen wird. Kein technischer luftseitiger Trapezquerschnitt mit Alibi-Pflanzungen, sondern als eine neu modellierte Topographie wurde vorgeschlagen. Kunstbauten, wie Drosseln oder Einlauf- bzw. Auslaufschlösser, d. h. Puffer volumen werden als Kunstskulpturen überhöht.

Das zweite Beispiel stellt ein V-Tal bei Kokel dar, welches mittels Staumauer eine Fusion von

terrassierter Unterwassertopographie, Krafthaus, Leerschuss und Überfallwehr mit dynamischen Wasser-Gischten strukturiert ist (**Bild 6**). Damit wird der absperrende Stauwandcharakter genommen.

Ein klassischer Konversionsstandort einer Kernstadtperipherie bei Kempten im Allgäu, Deutschland, stellt ein bemerkenswertes Beispiel von Überformung eines Altstandortes dar (**Bild 7**). Becker Architekten haben hier 2009 eine Neudisposition in der Iller vorgenommen und übliche Bauwerkskörper und Anlagenteile zu einer baulichen Topographie geformt, welche eine Art Anlandungs- und Verkolkungscharakteristik ausformulieren.

Inmitten der Weltkulturerbe-Stadt Salzburg, Österreich befindet sich eine weitestgehend fertiggestellte 19-MW-Kraftwerksanlage an der etwa 100 m breiten Salzach. Die Anlage stellt im urbanen Bereich seine besondere Herausforderung dar (**Bild 8**).

Die zukünftig frequente Verbindung von Stadtteilen und Wanderwegen entlang des Flusses erhebt die Anlage über bloße zurückhaltende, sensible Gestaltung als öffentliche Aufgabe hinaus. Ein Ort soll entstehen, eine Platzquerung am Wasser, und Aufenthalts- sowie Treffpunktqualitäten sind latente Ansprüche der Öffentlichkeit zur zukünftigen Akzeptanz. Neben herkömmlichen Standards, wie Fischauftstieg, Dotierung und Renaturierung einer abgeschnittenen Altau für Freizeitmöglichkeiten, wird eine Signature-Infrastruktur von Erich Wagner und dem Autor geschaffen.

Die Wehranlage soll die Energiezustände „Potential und Kinetik“ – also der hydraulischen Linie der Energieumsetzung – versinnbildlichen. Der Wucht und Trivialität von Wehrbrücke, Rechenreinigungsmaschine und Wehrpfeilern wurde eine pulsierende Dynamik durch modulierte Shilouettenbildung der Wehrpfeiler, Uferpfeiler und des Krafthauses eingehaucht. Die Assoziationen reichen von aufwärtsspringenden Fischzügen über Wasserwalzen und Kavitationszuständen bis hin zu Wasserüberfällen. Die komplexe Wellenform lässt einerseits durch serielle Wiederholung und Variabilität die tosenden Kräfte des Salzachflusses erahnen und löst andererseits so eine wasserwirtschaftliche Flussbarriere in Eleganz auf. Scheinbar fließt der Fluss seinen gewohnten Lauf.

## 4 Zusammenfassung

Diese fünf Beispiele sollen aufzeigen, wie sehr sich Einfühlbarkeit und Wirtschaftlichkeit zu einer örtlichen Signifikanz entwickeln können. Weder das Eine noch das Andere und auch selbst dies nicht kann schematisiert oder generalisiert werden, jedenfalls das Originäre ist aufzuspüren und umzusetzen, dann entstehen Identitäten und Orte, die mehr sind als technoiden Konstruktionen.

Dies gilt im Kleinen wie im Großen, im urbanen wie im ruralen Umfeld die Umsetzung des Lebendigen (Wassers) ist unserer Arbeit eingeschrieben.

**Autor**

**Dipl.-Ing. Mag.-arch. M. Max. Rieder**

ArchitekturWasserStadtlandschaft&

Gestaltungsprozesse

Lindengasse 56/2/20

1070 Wien, Österreich

rieder@maxrieder.at



**Bild 8:** Kraftwerk Sohlstufe Lehen/Salzach (Quelle: M. Rieder & E. Wagner)

Max Rieder

### **Hydropower Plants and Architecture**

Water, as elixir of life, forms diverse architecture and structures in varying climatic zones. Our history of civilization is inextricably tied to water. Water is the most flexible formal power. The infinite plurality through boundary conditions and states of aggregation is trivialized by conventional plant-construction. All possibilities of hydropower technologies should be visible, conscious and demonstrate art and culture of highest extent. The immanent energies embedded in water demand architectural expression. Architecture is eventually social art, just as water represents an ordinary element of socialising. Scales of water-power plants can be distorted or differing by their spatial context, though each plant may also establish or even destroy local identities. The scale, the dramaturgy of construction elements and their surface texture require the highest sensitivity towards the site-conditions. Any of the six examples poses a singular phenomenon.

Макс Ридер

### **Гидроэлектростанции и архитектура**

Вода является эликсиром жизни и в различных климатологических зонах оказывает воздействие на архитектурные формы и конструкции. История нашей цивилизации неотъемлемо связана с водой. Вода – это самая открытая по своей форме изобразительная сила. Безграничное разнообразие предельных условий и агрегатных состояний упрощается при обычном строительстве сооружений. Все водно-технические технологии должны четко и осознанно представлять собой искусство и культуру в наивысшей степени. Имеющаяся в воде энергия требует архитектурного выражения. В конце концов, архитектура – это социальное искусство, и точно также вода представляет собой социальный элемент. Масштабы гидроэнергетических сооружений меняются вследствие их расположения (городские сооружения, сооружения в сельской местности) и будут разными, однако, каждая гидроэлектростанция может подчеркнуть или разрушить индивидуальность населенного пункта. Масштаб, драматургия элементов сооружения и текстура его поверхностей требует особой тщательности в определении места размещения. Каждый из 6 представленных примеров представляет отдельный феномен.

# 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 Kreiselmotoren 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.

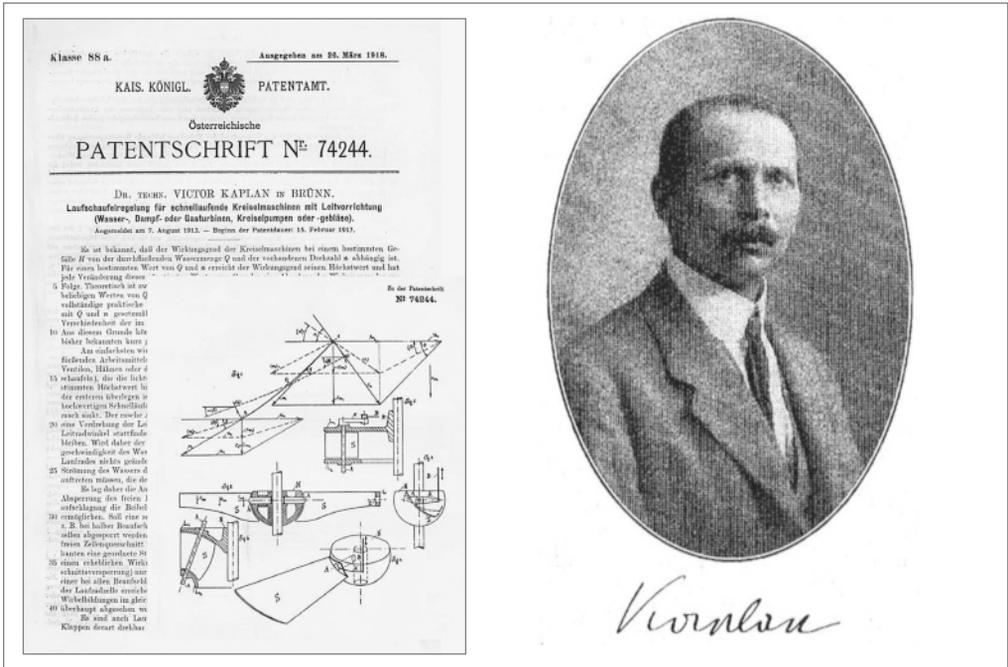


Bild 1: a) Patentschrift Viktor Kaplans von 1913; b) Viktor Kaplan

## 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 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 Freistrahl-turbine 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

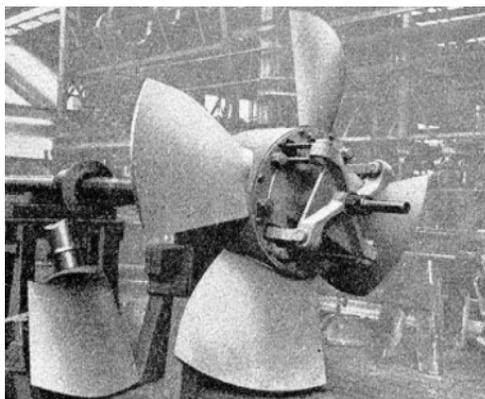
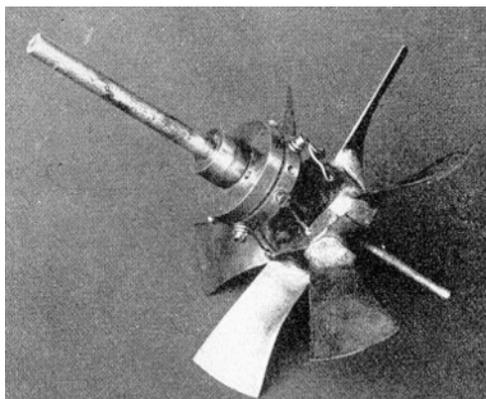


**Bild 2a:** Henschel-Jonval-Turbine, 1837, nicht regelbar

verstellbarer Beschau felung als direkter Vorläufer der Kaplan-Turbine mit praktisch der gleichen spezifischen Schnellläufigkeit anzusehen ist und als eine frühe Form der Schacht turbine 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 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



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

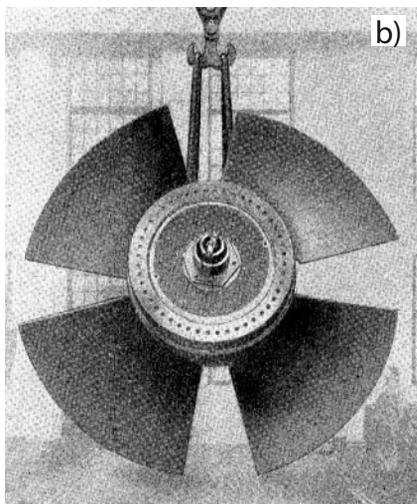
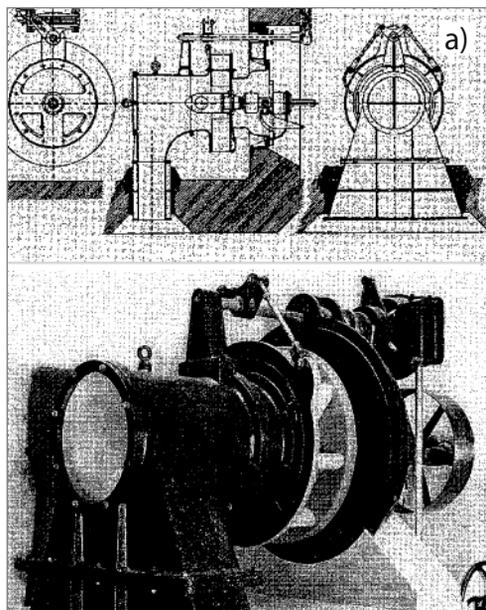
Schaufelbelastungen mit dem dann fast unvermeidlichen Kavitationsphänomen hervorbrachten. Um dem Phänomen Herr zu werden, nahm Viktor Kaplan Änderungen an der Beschauelungsgeometrie vor, was auch heute noch fast als Patentrezept für die Verbesserung des Kavitationsverhaltens und des Wirkungsgrads gelten 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

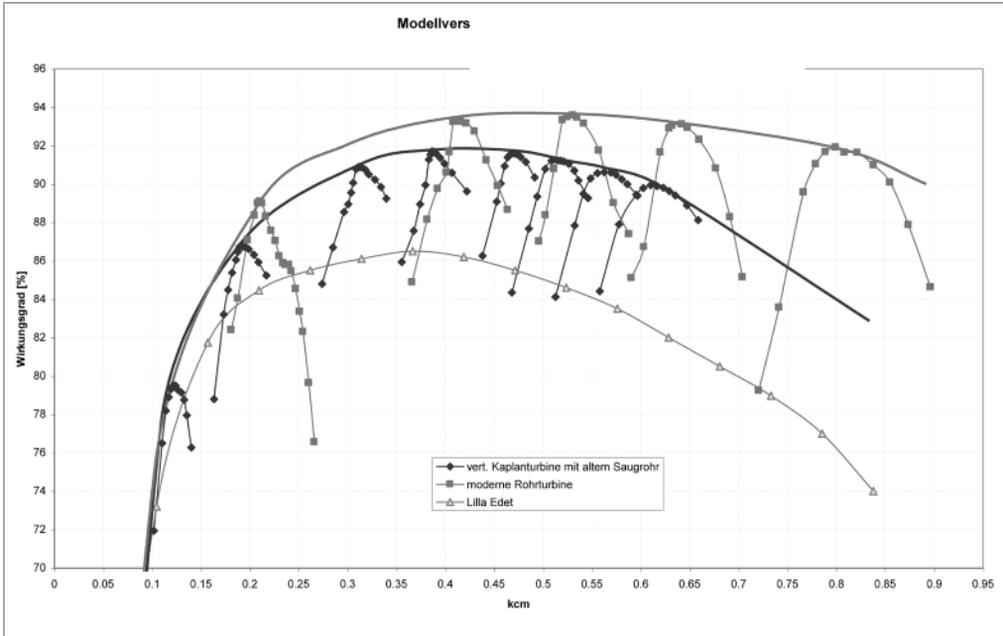
U. a. beim Kavitationsverhalten hilft die numerische Strömungsmechanik deutlich weiter. So gelingt es heute mit der numerischen Simulation zweiphasiger Strömungen, also der gleichzeitigen Betrachtung der flüssigen und der gasförmigen Phase sowie mit Berücksichtigung des Phasenübergangs die Blasenschleppen 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),  $P = 8,1$  MW,  $D = 5,8$  m; c) Oberaudorf-Ebbs (1992),  $P = 34,5$  MW,  $D = 6,1$  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.

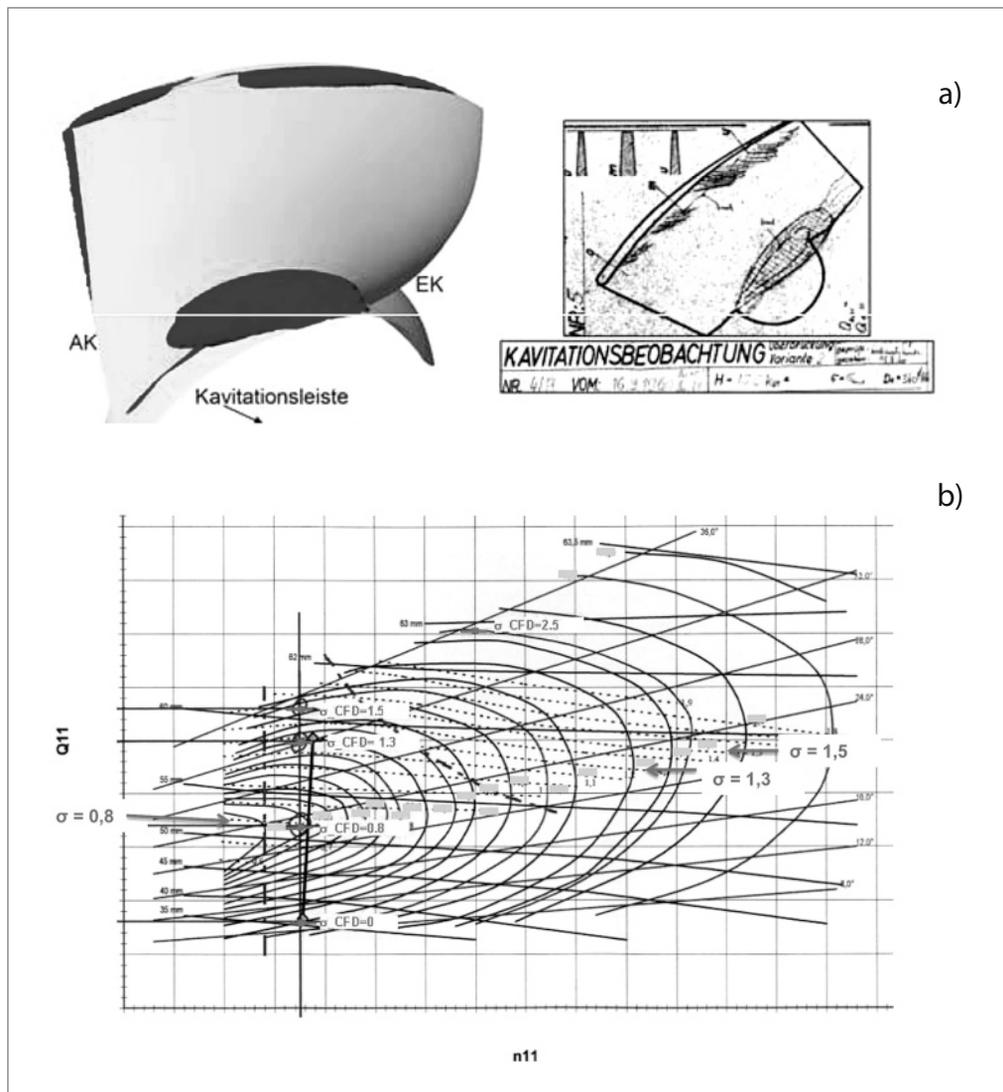
Ebenso stellt **Bild 6b** das gemessene Kennfeld einer Kaplan-Rohrturbine dar, wobei die geraden Linien die Leit- bzw. Laufschaufelstellungen angeben und die Muschelkurven wie üblich den Wirkungsgrad (hier ohne Angabe seiner Größe). Die gestrichelten Linien bezeichnen die gemessenen Sigma-Werte und die 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

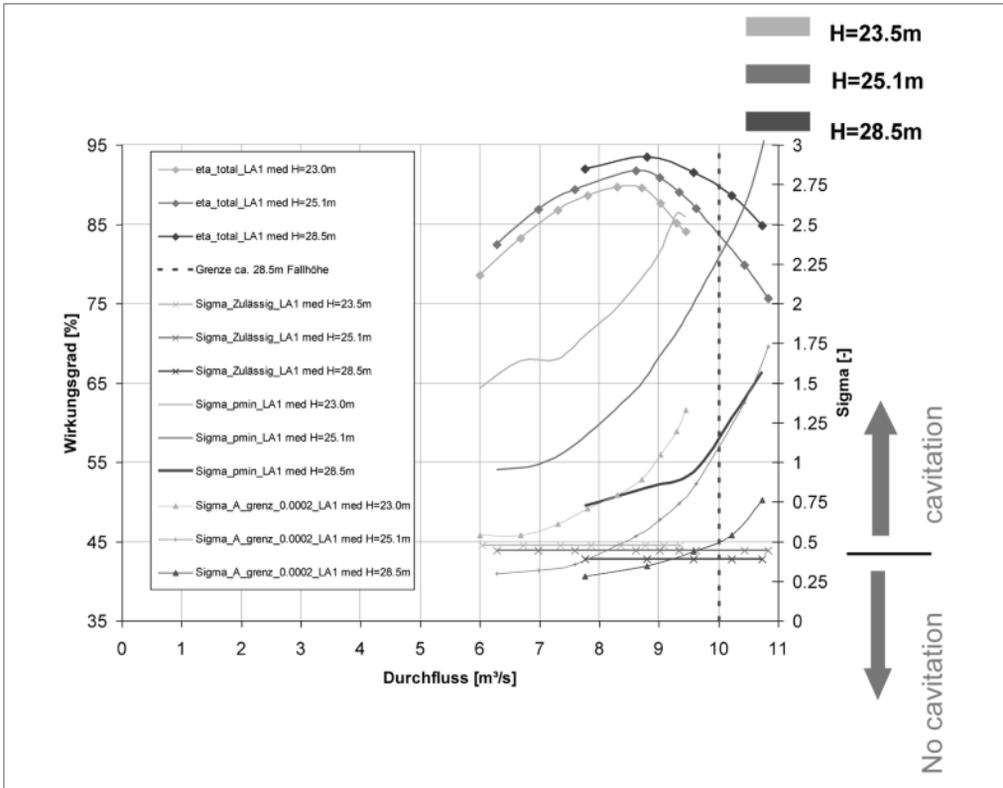
Es ist ziemlich leicht, den Kavitationsbeginn zu berechnen – natürlich mit dem Ziel, diesen zu vermeiden. Denn dann darf der statische Druck an keiner Stelle der Hydraulik bis auf den Dampfdruck absinken. Die Strömung bleibt also stets einphasig. Es ist im Übrigen nicht nur die Genauigkeit des Simulationscodes 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 viel schwieriger, weil streng genommen immer der Phasenübergang und die Kinetik der Flüssigkeit-Blasen-



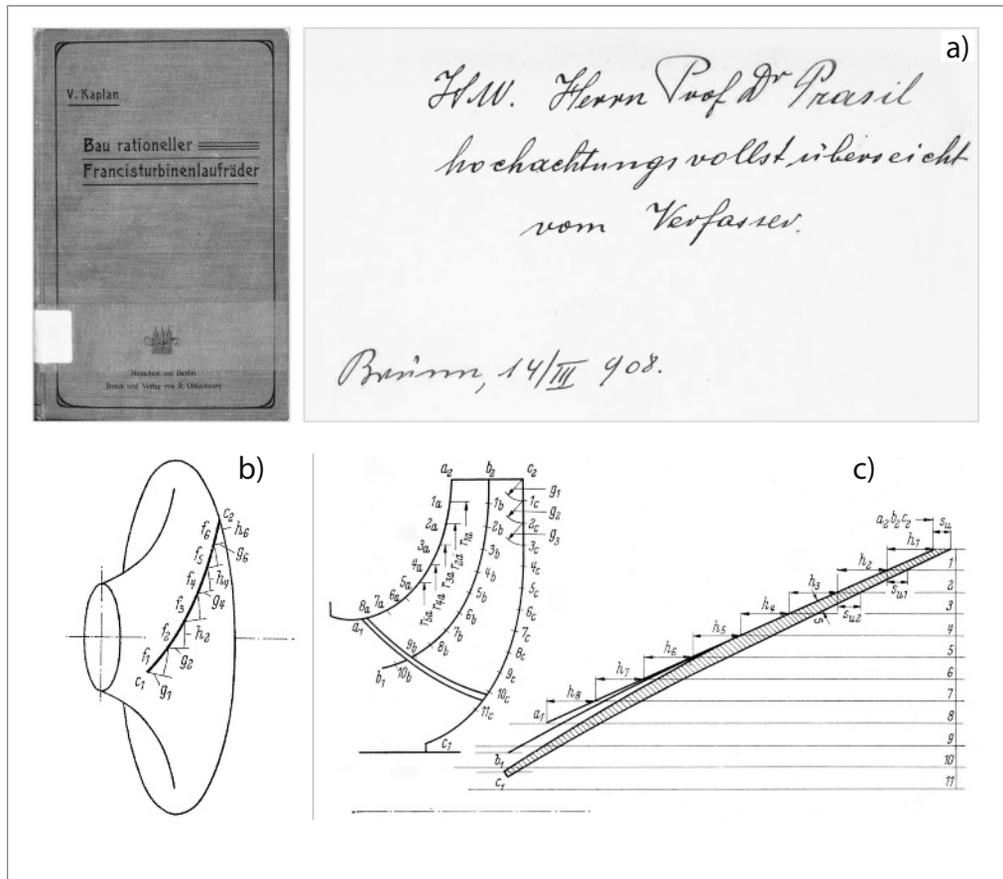
**Bild 7:** Verlauf der Thoma-Zahl einer Francis-Turbine und Vergleich mit den Anlagewerten für verschiedenen Leitradpositionen und Fallhöhen

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 Hydraul-

iker 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.